



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

무한초점 광학흐름센서 및
영상처리를 이용한 저조도, 미끄러운
실내 환경에서의 위치추정

Localization in Low Luminance, Slippery Indoor
Environment Using Afocal Optical Flow Sensor and
Image Processing

2017년 8월

서울대학교 대학원
전기·정보공학부
이 동 훈

무한초점 광학흐름센서 및
영상처리를 이용한 저조도, 미끄러운
실내 환경에서의 위치추정

지도 교수 조 동 일

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2017년 8월

서울대학교 대학원
공과대학 전기·정보공학부
이 동 훈

이동훈의 공학박사 학위논문을 인준함
2017년 8월

위 원 장	이 범 희	(인)
부위원장	조 동 일	(인)
위 원	김 현 진	(인)
위 원	오 성 회	(인)
위 원	김 광 수	(인)

초 록

실내 서비스로봇의 위치 추정은 자율 주행을 위한 필수 요건이다. 특히 카메라로 위치를 추정하기 어려운 실내 저조도 환경에서 미끄러짐이 발생할 경우에는 위치 추정의 정확도가 낮아진다. 미끄러짐은 주로 카펫이나 문턱 등을 주행할 때 발생하며, 휠 엔코더 기반의 주행기록으로는 주행 거리의 정확한 인식에 한계가 있다.

본 논문에서는 카메라 기반 동시적 위치추정 및 지도작성 기술(simultaneous localization and mapping; SLAM)이 동작하기 어려운 저조도, 미끄러운 환경에서 저가의 모션센서와 무한초점 광학흐름센서(afocal optical flow sensor; AOFS) 및 VGA급 전방 단안카메라를 융합하여 강인하게 위치를 추정하는 방법을 제안했다. 로봇의 위치 추정은 주행거리 순간 변화량과 방위각 순간 변화량을 누적 융합하여 산출했으며, 미끄러운 환경에서도 좀 더 정확한 주행거리 추정을 위해 휠 엔코더와 AOFS로부터 획득한 이동 변위 정보를 융합했고, 방위각 추정을 위해 각속도 센서와 전방 영상으로부터 파악된 실내 공간정보를 활용했다.

광학흐름센서는 바퀴 미끄러짐에 강인하게 이동 변위를 추정 하지만, 카펫처럼 평평하지 않은 표면을 주행하는 이동 로봇에 광학흐름센서를 장착할 경우, 주행 중 발생하는 광학흐름센서와 바닥 간의 높이 변화가 광학흐름센서를

이용한 이동거리 추정 오차의 주요인으로 작용한다. 본 논문에서는 광학흐름센서에 무한초점계 원리를 적용하여 이 오차 요인을 완화하는 방안을 제시하였다. 로봇 문형 시스템(robotic gantry system)을 이용하여 카펫 및 세가지 종류의 바닥재질에서 광학흐름센서의 높이를 30 mm 에서 50 mm 로 변화시키며 80 cm 거리를 이동하는 실험을 10번씩 반복한 결과, 본 논문에서 제안하는 AOFS 모듈은 1 mm 높이 변화 당 0.1% 의 계통오차(systematic error)를 발생시켰으나, 기존의 고정초점방식의 광학흐름센서는 14.7% 의 계통오차를 나타냈다. 실내 이동용 서비스 로봇에 AOFS를 장착하여 카펫 위에서 1 m 를 주행한 결과 평균 거리 추정 오차는 0.02% 이고, 분산은 17.6% 인 반면, 고정초점 광학흐름센서를 로봇에 장착하여 같은 실험을 했을 때에는 4.09% 의 평균 오차 및 25.7% 의 분산을 나타냈다.

주위가 너무 어두워서 영상을 위치 보정에 사용하기 어려운 경우, 즉, 저조도 영상을 밝게 개선했으나 SLAM에 활용할 강인한 특징점 혹은 특징선을 추출하기 어려운 경우에도 로봇 주행 각도 보정에 저조도 이미지를 활용하는 방안을 제시했다. 저조도 영상에 히스토그램 평활화(histogram equalization) 알고리즘을 적용하면 영상이 밝게 보정 되면서 동시에 잡음도 증가하게 되는데, 영상 잡음을 없애는 동시에 이미지 경계를 뚜렷하게 하는 롤링 가이드선 필터(rolling guidance filter; RGF)를 적용하여 이미지를 개선하고, 이 이미지에서 실내 공간을 구성하는 직교 직선 성분을 추출 후 소실점(vanishing point; VP)을 추정하고 소실점을 기준으로 한 로봇 상대 방위각을 획득하여 각도 보정에

활용했다. 제안하는 방법을 로봇에 적용하여 0.06 ~ 0.21 lx 의 저조도 실내 공간(77 m²)에 카펫을 설치하고 주행했을 경우, 로봇의 복귀 위치 오차가 기존 401 cm 에서 21 cm로 줄어듦을 확인할 수 있었다.

주요어 : 무한초점 광학흐름센서, 실내 위치추정, 저조도 영상

학 번 : 2014-31072

목 차

초 록	i
목 차	iv
표 목차	vii
그림 목차	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 선행 연구 조사	6
1.2.1 실내 이동형 서비스 로봇의 미끄러짐 감지 기술	6
1.2.2 저조도 영상 개선 기술	8
1.3 기여도	12
1.4 논문의 구성	14

제 2 장 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈.....	16
2.1 무한초점 시스템(afocal system)	16
2.2 바늘구멍 효과.....	18
2.3 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 프로토타입	20
2.4 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 실험 계획.....	24
2.5 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 실험 결과.....	29
제 3 장 저조도영상의 방위각보정 활용방법.....	36
3.1 저조도 영상 개선 방법	36
3.2 한 장의 영상으로 실내 공간 파악 방법	38
3.3 소실점 랜드마크를 이용한 로봇 각도 추정.....	41
3.4 최종 주행기록 알고리즘	46
3.5 저조도영상의 방위각 보정 실험 계획.....	48

3.6 저조도영상의 방위각 보정 실험 결과.....	50
제 4 장 저조도 환경 위치인식 실험 결과	54
4.1 실험 환경.....	54
4.2 시뮬레이션 실험 결과.....	59
4.3 임베디드 실험 결과.....	61
제 5 장 결론.....	62
참고 문헌.....	64
Abstract.....	76
감사의 글.....	79

표 목차

표 2-1 다양한 재질에서 센서 높이 별 이동거리 인식 비교표.....34

표 2-2 루프 스타일 카펫 위에서 로봇 1M 주행 시 위치 추정 결과35

그림 목차

그림 1-1 위치인식이 중요한 실내 서비스 로봇.....	1
그림 1-2 실내 환경의 일반 조도 영상(좌) 및 저조도 영상(우).....	2
그림 1-3 미끄러짐이 발생하는 환경 예.....	3
그림 1-4 A-KAZE[83] 특징점 추출 및 매칭 결과.....	4
그림 1-5 ORB[81] 특징점 추출 및 매칭 결과.....	5
그림 1-6 광마우스 단면도.....	6
그림 1-7 광학흐름센서 동작원리.....	7
그림 1-8 히스토그램 평활화 적용 전(좌), 후(우).....	9
그림 1-9 저조도 영상에 히스토그램 평활화 적용 전(좌), 후(우).....	10
그림 1-10 저조도 영상에 SSR 알고리즘 적용 전(좌), 후(우).....	10
그림 2-1 무한초점 시스템 구성도.....	16

그림 2-2 광학흐름센서 ADNS-3080 사진.....	20
그림 2-3 AOFS 모듈의 구조(좌) 및 단면도(우)	21
그림 2-4 AOFS 모듈 사진.....	22
그림 2-5 AOFS 모듈 실험 장치.....	24
그림 2-6 실험에 사용된 바닥 재질.....	25
그림 2-7 AOFS가 장착된 이동로봇.....	26
그림 2-8 레이저로 측정한 루프 스타일 카펫의 표면 높이 변화.....	26
그림 2-9 카펫이 설치된 실험 공간.....	27
그림 2-11 바이콘 모션 캡처 카메라 및 적외선 마커가 장착된 로봇.....	28
그림 2-10 바이콘 모션 인식 시스템이 설치된 실험 공간.....	28
그림 2-13 센서 높이 별 획득된 영상.....	29
그림 2-14 바닥재 종류 별, 센서 높이 별 10번 반복 측정 평균 및 표준편차	30

그림 2-15 카펫이 없는 환경에서 휠 엔코더와 각속도센서로 추정한 로봇

궤적.....31

그림 2-16 카펫 환경에서 휠 엔코더, 각속도센서, AOFS로 추정한 로봇

궤적.....32

그림 2-17 카펫 환경에서 휠 엔코더와 각속도센서로 추정한 로봇 궤적33

그림 3-1 저조도 영상 개선 후 실내공간 구조를 추출한 영상.....36

그림 3-2 롤링 가이드선 필터 원리[52].....37

그림 3-3 영상상에서 세 개의 소실점 추출 예시38

그림 3-4 직선 추출 영상(좌)과 추정 영상(우).....39

그림 3-5 실내구조 기준 로봇 상대 방위각 추정 결과.....41

그림 3-6 로봇과 공간 좌표계 관계.....42

그림 3-7 벽 기준 방위각과 로봇 기준 방위각 변환 관계도.....43

그림 3-8 단일 및 삼중 맨하탄 프레임 구조.....	43
그림 3-9 로봇과 공간 관계 예시.....	44
그림 3-10 최종 주행기록 알고리즘 순서도.....	46
그림 3-11 조도 조절 시스템.....	48
그림 3-12 조명 점등 조건에서 카펫 환경에서 휠 엔코더, 각속도센서,AOFS 융합을 통한 위치 추정 및 소실점을 활용하여 각도도 보정한 로봇 궤적	50
그림 3-13 조명 점등 후, 소실점을 추출한 영상(좌), 각도보정 결과(우)	51
그림 3-14 조명 소등 후, 직선을 추출한 영상.....	52
그림 3-15 어두운 영상에 히스토그램 평활화 후 롤링 가이던스 필터를 적용한 주행 결과.....	53
그림 3-16 어두운 영상에 히스토그램 평활화만 적용한 주행 결과.....	53

그림 4-1 실험에 사용된 실내 이동로봇	54
그림 4-2 실험환경 도면.....	55
그림 4-3 실험환경 가구 배치도.....	56
그림 4-4 실험공간 카펫 배치도.....	56
그림 4-5 저조도 실내 환경 사진.....	57
그림 4-6 조도 측정 방법	58
그림 4-7 저조도 환경에서의 제안하는 위치인식 방법 시뮬레이션 결과....	59
그림 4-8 저조도 환경에서 비교실험 결과.....	60
그림 4-9 저조도 환경에서 제안하는 위치인식 방법의 임베디드 보드 포팅 후 실시간 실험 결과.....	61

제1장 서론

1.1 연구의 배경

실내 서비스 로봇이란 사무실, 학교, 주택 같은 실내에서 사람과 공존하며 특정 서비스를 제공해주는 로봇을 지칭한다[1]-[6]. 이렇게 복잡하고 역동적인 실내 공간에서 서비스 로봇이 충실하게 임무를 수행하기 위해서는 로봇이 스스로 정확하고 정밀하게 위치 추정을 할 수 있는 기술이 필요하다(그림 1-1).

두 바퀴 기반 이동 로봇이 기본적으로 위치를 추정하는 방법은 휠 엔코더로 주행거리를 측정하고, 각속도센서로 각도 변위를 측정한 데이터를 융합하는 것이지만 시간이 지남에 따라 거리 및 각도 오차가 누적되어 발산하는 단점을 가지고 있다[7][8]. 이를 해결하기 위해, 전역 오차 보정 기법이 도입되었고, 이는 크게 실내 환경에 장치를 설치하는 방식[9]과 로봇이 스스로 오차를 보정하는 방식[10]으로 나뉜다.



그림 1-1 위치인식이 중요한 실내 서비스 로봇

실내에 측위 인프라를 활용하는 방법의 예는 와이파이 접근 장치(wireless access point; WAP)와의 거리에 따라 감쇄하는 신호 강도로부터 위치를 추정하는 방법[11][12], 초광대역(ultra-wideband; UWB) 비콘(beacon)을 다수 설치하여 위치를 삼각 측량하는 방법[13], 건물 실내 구조 정보와 초광대역 비콘을 함께 활용하는 방법[14], 다수의 카메라 설치하여 영상 처리를 통해 로봇의 절대 위치를 추정하는 방법[15], 바닥에 바코드를 인쇄하거나[16] RFID 태그를 부착하여 로봇의 위치를 추정하는 방법[17] 등이 있다. 이런 방법은 사전에 장비를 설치하고 교정(calibration)을 해야 하므로, 서비스로봇의 설치 편의성 관점에서는 맞지 않다고 볼 수 있다.

따라서, 최근 상용화에 성공한 서비스로봇의 위치인식 방식은 대부분 외부 도움없이 로봇 스스로 위치 오차를 보정하는 방식이 적용되어 있으며, 크게



그림 1-2 실내 환경의 일반 조도 영상(좌) 및 저조도 영상(우)

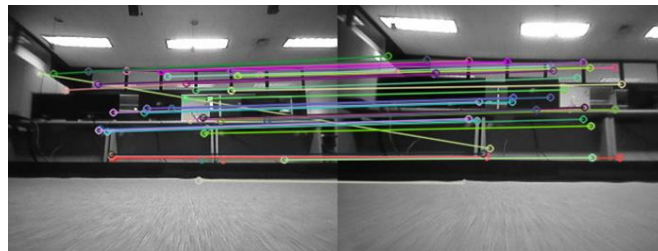
카메라를 활용하거나[18][19] 레이저 스캐너(laser scanner)를 사용하는 방식으로 나뉜다[20]. 레이저 스캐너는 대부분 고가이므로, 본 논문에서는 상대적으로 저렴한 카메라를 활용하는 방법에 초점을 맞춘다.

현재까지 연구된 단안 카메라를 이용한 위치 추정 방법에 대해 살펴보면, 카메라 하나만 가지고도 실내외에서 위치를 추정할 수 있는 연구가 거의 완성단계에 접근하였으나[21][22] 카메라 동작 원리상 실내 환경이 어두우면 이미지 센서에 도달하는 빛의 양이 감소하여 특징점 추출 및 매칭 성능이 떨어지는 단점이 존재한다(그림 1-4, 그림 1-5). 특히 그림 1-2 의 오른쪽 영상처럼 카메라로 위치를 인식하기 어려운 저조도 환경에서 로봇 주행 중 미끄러짐이 발생할 경우에는 위치 추정의 정확도가 현저히 낮아질 수 밖에 없다[23][24]. 보통 미끄러짐은 그림 1-3 처럼 카펫이나 깔개, 문턱 위를 주행할 때 발생하는데, 휠 엔코더 기반의 주행기록으로는 미끄러짐을 인식할 수 없으며,

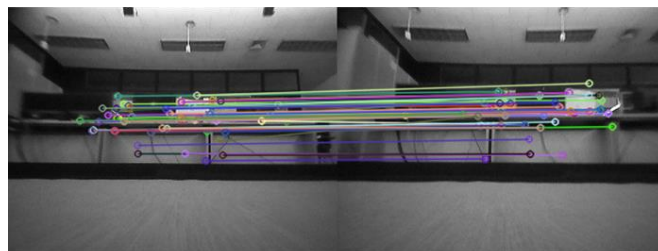


그림 1-3 미끄러짐이 발생하는 환경 예

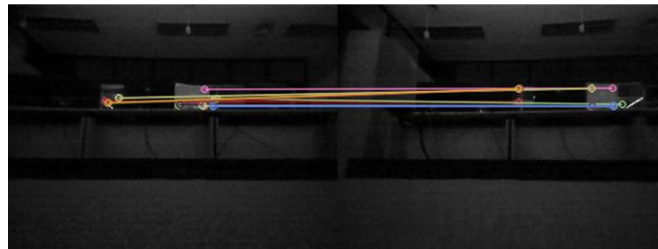
가속도 센서를 함께 사용하여 추정할 경우에도 적분 오차가 존재하게 된다.



(a) 120.0 lx



(b) 12.0 lx



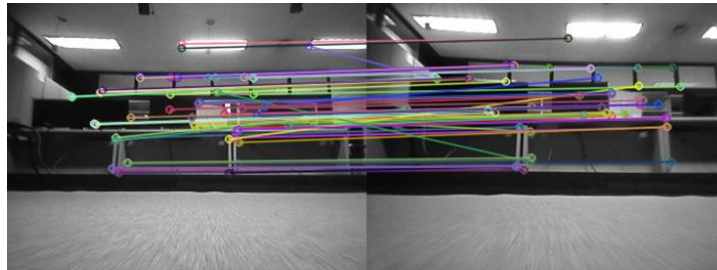
(c) 2.0 lx



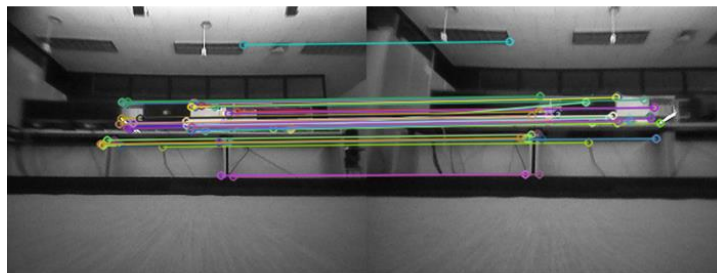
(d) 0.3 lx

그림 14A-KAZE[83] 특징점 추출 및 매칭 결과

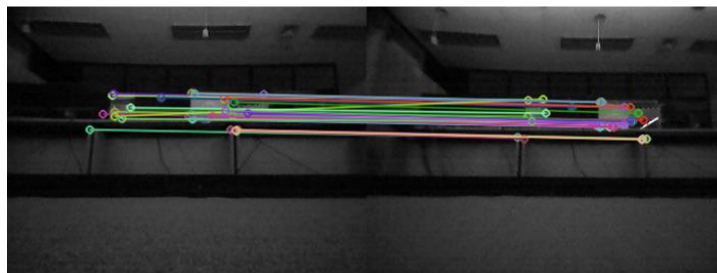
따라서, 저조도 화면 환경에서도 강인하게 위치 추정을 할 수 있는 방법을 찾기 위해 이 연구를 진행하게 되었다.



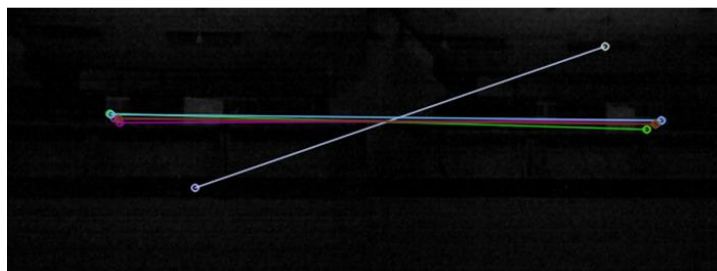
(a) 120.0 lx



(b) 12.0 lx



(c) 2.0 lx



(d) 0.3 lx

그림 1-5 ORB[81] 특징점 추출 및 매칭 결과

1.2 선행 연구 조사

본 논문에서 초점을 맞추고 있는 모션 센서 및 전방 단안 카메라 기반의 위치 추정 연구에 대한 선행 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1.2.1 실내 이동형 서비스 로봇의 미끄러짐 감지 기술

미끄러짐 감지를 위한 가장 대표적인 알고리즘은 휠 엔코더의 출력 정보와 각속도 센서 및 가속도 센서 정보를 칼만필터(Kalman filter)로 처리하여 로봇이 이동한 변위를 추정하는 것이다. 그러나, 이 방법은 가속도 센서의 이중 적분에 의한 오차가 존재하므로 주행 거리가 증가할수록 위치 오차도 증가한다[25]. 또한 가속도 센서는 정지상태에서의 영점 조정이 필요한데 조정 이후에도 주위 온도나 중력에 따라 오차가 변화한다[26]. 이에 대한 대안으로, 로봇 위치 인식에 1990년대 후반부터 본격적으로 보급된 광학식 마우스(optical mouse)를 이용하는 연구가 활발히 진행되었다[27]~[39]. 광학식 마우스에 장착된

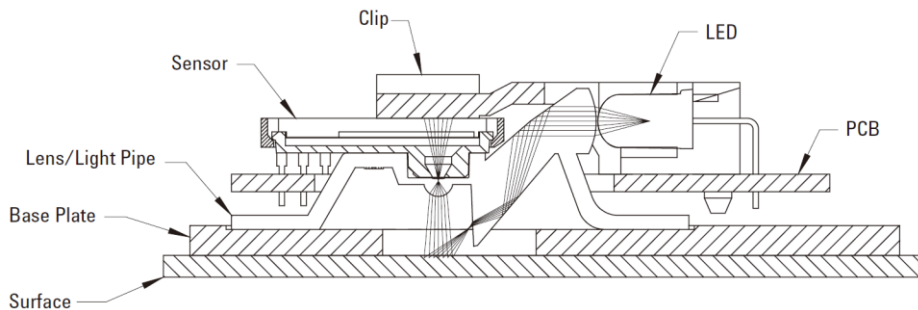


그림 1-6 광마우스 단면도

광학흐름센서(optical flow sensor; OFS)의 구조는 그림 1-6 과 같다. LED에서 생성된 빛을 바닥 표면에 조사하면 표면에 반사된 빛이 렌즈로 집광 되어 이미지 센서로 수집된다. 이 때, OFS 내부의 디지털신호처리장치가 수집된 이미지의 변화량을 분석하여 x축,y축 이동 변위를 계산한다(그림 1-7)[40].

2000년대 초에는 OFS로 다양한 실험이 수행되었는데, 바닥 재질, 바닥과 센서의 높이, 바닥에 조사되는 광량, 속도 등을 다르게 하면서 동작 특성을 확인한 결과 로봇의 위치추정 센서로 사용하기 위해 개선되어야 하는 부분은 OFS의 동작이 보장되는 바닥과의 높이로 밝혀졌다[29][37]. OFS의 동작이 보장되는 높이는 2.7 mm 이내이므로, OFS를 로봇 하단에 최대한 가깝게 장착해야 하며, 이는 로봇이 주행 중 타고 넘을 수 있는 장애물 높이를 제한함과 동시에 높이 변화가 심한 카펫, 문턱 등에서 미끄러짐이 발생 시 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 없는 한계로 작용했다. 이를 극복하기 위해 다양한 시도가 이루어졌는데, OFS를 2개부터 8개까지 다수 개를 사용하여 위치 측정 분산을 최소화하는 방법[38][41], 초점거리를 늘린 OFS를 여러 개 장착하는

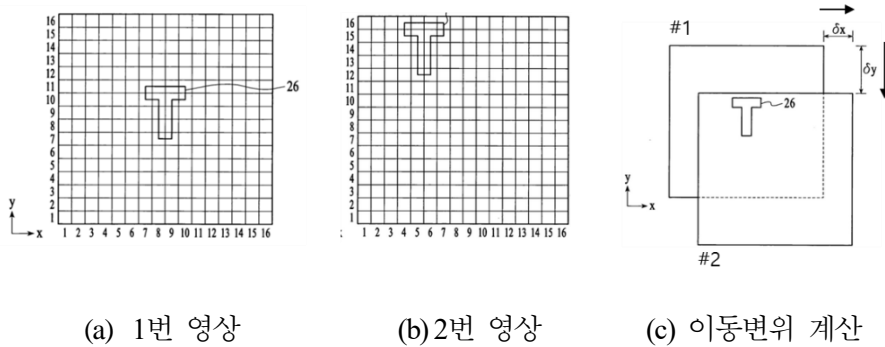


그림 1-7 광학흐름센서 동작원리

방법[39][42] 등이 시도되었으나 OFS의 바닥과의 거리 변화에 따라 주행거리 환산 계수도 변화하여 이동거리의 정확한 추정에 어려움을 겪었다. 이에 대한 극복 방안으로 2000년대 말에 OFS 두 개를 서로 다른 높이에 배치하여 높이 변화에 무관하게 주행 거리를 얻을 수 있는 방법이 제시되었다[43]. 하지만 이 방법은 OFS 두 개가 필요하며, 바닥과의 높이 변화에 의한 이미지 흐려짐 현상이 존재하고 광 분리기 제작도 어렵고 비싸다는 단점이 있다.

1.2.2 저조도 영상 개선 기술

저조도 영상을 개선하는 연구는 오래전부터 최근까지 활발히 이루어져왔으며[44]~[47] 가장 유용한 방법은 히스토그램 평활화이다[48]. 영상의 품질향상을 위해서는 조명 밝기를 조절하여 명암 값의 분포가 최대한 넓어야 하는데, 명암 값의 분포가 한쪽으로 치우치거나 균일하지 못한 영상은 히스토그램 평활화라고 불리는 처리에 의해 명암 값 분포를 균일화하여 영상의 명암 대비를 개선할 수 있다. 그림 1-8 에 히스토그램 평활화를 적용하기 전 영상과 수행 후 영상을 나타냈다. 하지만, 그림 1-9 처럼, 어두운 영상에 적용할 경우, 노이즈가 심하게 발생하는 역효과가 있다.

또 다른 방법으로는 영상 기반 위치 추정 시 조도 변화에 강인한 영상을 획득하기 위해 인간의 시각 모델을 바탕으로 한 레티넥스(retinex) 알고리즘이 연구되어 왔다[49]~[51]. 레티넥스 알고리즘은 영상의 색대비를 향상시키거나,



그림 1-8 히스토그램 평활화 적용 전(좌), 후(우)

선명도를 증진시킬 때 주로 사용한다. 레티넥스 알고리즘의 기본원리는 입력 영상에 들어있는 배경 성분을 제거하는 것이다. 식 1-1처럼, 입력영상 I 는 영상 반사율(scene reflectance) R 과 조명 성분(illumination) L 의 곱으로 볼 수 있다.

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1-1)$$

$$G(x, y) = A \exp(-(x^2 + y^2) / 2\sigma^2) \quad (1-2)$$

$$\text{배경영상} = G(x, y) * I(x, y) \quad (1-3)$$

$$R_{SSR}(x, y) = \log(\text{반사성분}) = \log(\text{입력영상} / \text{배경영상}) \quad (1-4)$$

$$R_{SSR}(x, y) = \log I(x, y) - \log \{G(x, y) * I(x, y)\} \quad (1-5)$$

배경영상(식 1-3)은 입력영상의 평균적인 영상으로 생각할 수 있으며, 이것은 적당한 크기(scale)의 가우시안 필터(Gaussian filter)(식 1-2)를 적용하여 식 1-3처럼 얻을 수 있다. 식 1-2의 A 는 정규화 파라미터(normalize parameter)로서

$\sum_x \sum_y G(x, y) = 1$ 을 만족하는 것으로 설정한다. 이 가우시안 필터를

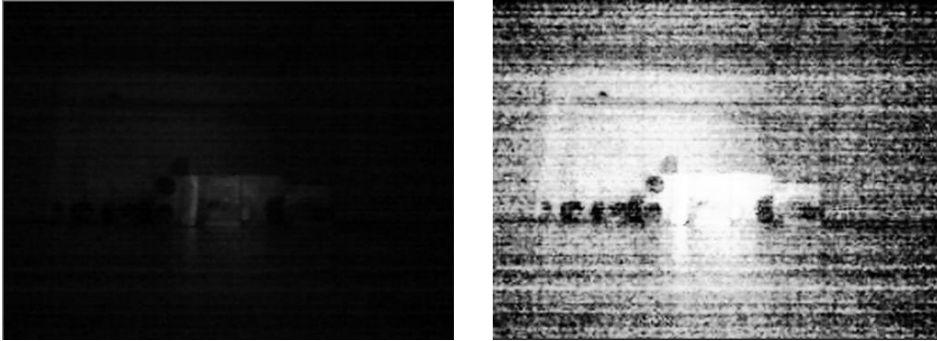


그림 1-9 저조도 영상에 히스토그램 평활화 적용 전(좌), 후(우)

적용하면 입력영상에서 필터 크기 보다도 작은 크기는 무시하는 효과를 준다. 그 다음으로, 입력 영상의 배경 조명에 무관한 반사 성분은 앞서 구한 배경 영상으로 나누면 된다. 식 14의, 레티넥스 영상출력은 이 반사 성분에 로그 값을 취한 것이며, 이로 인해 반사 성분의 분포 범위를 압축하는 효과를 얻는다. 이처럼 하나의 스케일에 대해 적용하는 경우를 SSR(single-scale retinex)알고리즘이라고 한다[50].

레티넥스 영상을 구할 때, 하나의 크기가 아니라 여러 크기에 대해서 적용한 레티넥스 영상에 적절한 가중치를 주어서 합한 결과를 출력 영상으로

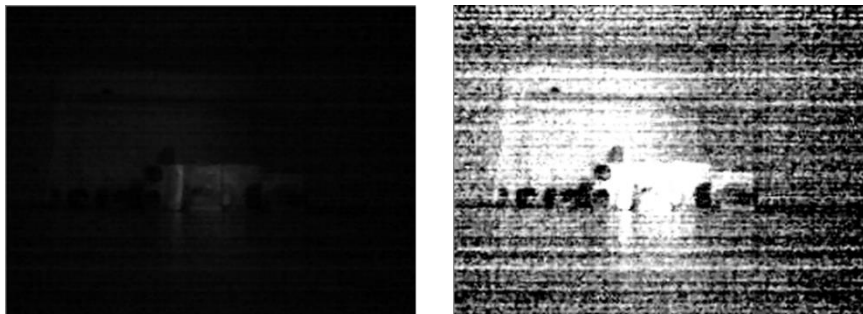


그림 1-10 저조도 영상에 SSR 알고리즘 적용 전(좌), 후(우)

사용할 수 있는데 이것이 MSR(multi-scale retinex) 알고리즘이다. 그러나 이러한 레티넥스 알고리즘은 가우시안 필터링의 스무딩(smoothing) 효과로 인해 전역적인 색대비 감소와 후광효과 및 색왜곡 문제가 발생하며, 히스토그램 평활화 대비 성능 개선 정도가 크지 않다.

1.3 기여도

본 논문에서는 전방 단안 카메라 기반 실시간 지도작성 및 위치 추정 기술이 동작하기 어려운 저조도 환경에서, 카펫처럼 로봇이 주행 시 바퀴 미끄러짐이 자주 발생하는 상황에서도 실내 서비스 로봇 스스로 위치 추정이 가능한 기술을 제안했다. 가장 저렴한 센서인 휠 엔코더, 각속도센서 및 본 논문에서 제안하는 AOFS와 단안 카메라를 사용하여 위치 추정 기술의 성능을 개선하였다.

기존 OFS의 한계점인 바닥과 OFS 간 거리 변화에 의한 영상 흐려짐 현상 및 거리환산계수 변화를 최소화하면서, OFS를 하나만 사용하여 OFS와 바닥 간 높이 변화에 강인하게 주행거리를 추정했다. 기존 OFS의 단점을 개선하기 위해 최초로 무한초점 시스템(afocal system) 및 바늘구멍 카메라 원리(pinhole camera)을 적용한 AOFS를 제안했으며, AOFS를 사용하면 카펫이나 문턱 등반 시 발생하는 높이 변화에 강인하게 주행거리를 추정한다.

또한, 기존에는 영상 기반 위치 추정 시 너무 어두운 영상은 활용하지 못했는데, 본 논문에서는 0.1 lx 수준의 저조도 영상도 영상처리를 통해 로봇 방위각 보정에 활용하는 기법을 제안했다. 기존 영상 기반 SLAM에서 활용하기 어려운 0.1 lx 수준의 저조도 영상을 활용하기 위해, 히스토그램 평활화로 영상을 밝게 한 후 롤링 가이던스 필터[52][53]를 적용하여 영상 잡음을 없애면서 동시에 이미지 경계를 뚜렷하게 했다. 밝기 및 잡음이 개선된 영상에서 실내

환경에 다수 분포하는 직선 선분을 추출하고 비슷한 방향 별로 분류한 후 서로 직교하는 세 방향을 구해 소실점을 추정한다. 이렇게 구한 소실점을 활용하여 공간과 로봇 간 각도 차이를 추정한 후 로봇의 방위각을 보정하는데 활용하는 방안을 제시했다.

조도 조절이 가능한 실험공간에서 조도를 다양하게 조절하며 제안하는 알고리즘의 동작을 보장하는 최저 조도 조건을 확인했으며, 최신 영상기반 SLAM인 ORB(oriented FAST and rotated BRIEF) SLAM[21]과 성능을 비교하였다. 비교실험군의 위치 획득 센서는 전방 카메라, 휠 엔코더, 각속도 센서로 구성했으며, 본 논문이 제안하는 실험군은 AOFS를 추가로 사용했다. 실제 로봇을 주행하면서 전방 영상 및 주행기록 정보를 메모리에 저장하여 시험 영상 데이터셋을 획득하였고, 이를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 사전 검증을 수행하였다. 또한, 제안하는 알고리즘을 로봇의 ARM Cortex A9 보드에 포팅하여 위치 추정 실험을 수행했다. 0.06~0.21 lx의 조도 환경에서 실험결과 비교 실험군의 복귀 오차 400.8 cm 대비 제안하는 방법의 복귀 오차는 18.4 cm 로 확인되어 위치 추정 성능이 크게 개선되는 것을 확인하였다.

1.4 논문의 구성

본 논문의 제1장 서론에 이어 제2장 이하의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 본 논문을 통해 제안하는 저조도 미끄러운 실내 환경에서도 강인하게 주행 거리를 추정하기 위한 AOFS의 원리 및 실험 결과에 대해 기술한다. 1절에서는 AOFS에 적용된 무한초점계를 설명하고, 2절에서는 OFS와 바닥 간 높이 변화에 기인된 이미지 번짐 효과를 최소화하는 방법을 기술하고, 3절에서는 제작된 AOFS 및 이를 이용하여 다양한 재질과 높이에서 실험한 결과를 기술한다.

3장에서는 저조도 영상을 개선하여 맨하탄 프레임(Manhattan frame)을 구성하는 직선 성분을 추출한 후 방위각 보정에 활용하는 방법을 기술한다. 1절에서는 이미지 내 경계를 뚜렷이 하면서 경계 내 잡음을 줄여주는 롤링 가이던스 필터를 설명하고, 2절에서는 하나의 영상으로 3차원 실내 구조를 파악하는 방법을 설명한 후, 3절에서는 파악된 소실점을 로봇 방위각 보정에 활용하는 방법을 기술한다. 4절에서는 휠 엔코더, 각속도 센서, AOFS, 영상에서 추출한 소실점 랜드마크를 융합하여 최종 주행기록을 산출하는 알고리즘을 설명하고, 5절에서는 제안하는 방식에 대한 실험 계획을 설명하고, 이어서 6절에서는 저조도 영상으로 방위각 보정 실험을 수행한 결과를 기술한다.

4장에서는 2장과 3장에서 소개한 기술을 융합하여 실내 가정환경과 유사한 실험공간에서 실험한 결과를 기술한다. 1절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 알고리즘 테스트 방법 및 그 결과에 대해 기술하고, 2절에서는 ARM Cortex A9 임베디드 보드에 본 논문에서 제안한 알고리즘을 포팅하여 실험한 결과를 기술한 후, 3절에서는 제안하는 방법의 실험결과와 최신 ORB SLAM의 실험 결과를 비교한다.

마지막으로 제5장은 본 논문의 내용 및 결과를 요약하고 제안하는 방법에 대한 전체적인 총평과 응용 가능성 검토와 더불어 결론을 맺는다.

제 2 장 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈

2.1 무한초점 시스템(afocal system)

본 논문에서는 OFS의 높이 변화에 의한 주행거리 추정 오차를 줄이기 위해, OFS에 무한초점계 원리를 적용한 AOFS를 제안한다. 광학에서 무한초점시스템 즉 초점이 무한대에 있는 시스템이란 렌즈로 구성된 시스템을 통과한 입사광선이 수렴 또는 발산을 하지 않는 즉, 무한 유효 초점 길이를 갖는 광학시스템이다[54]. 무한초점 시스템은 두 렌즈의 조합으로 구성되며, 첫번째 렌즈의 초점을 두번째 렌즈의 초점과 일치시키면, 물체 공간에서 광 축과 평행하게 입사한 광선은 위상이 반전된 후 이미지 공간에 평행하게 조사된다(그림 2-1). 즉, 입사광선이 무한초점시스템 통과 후 수렴 하지도 발산 하지도 않아 바닥과의 거리 변화에 따른 상 크기의 변화가 없게 된다. 즉,

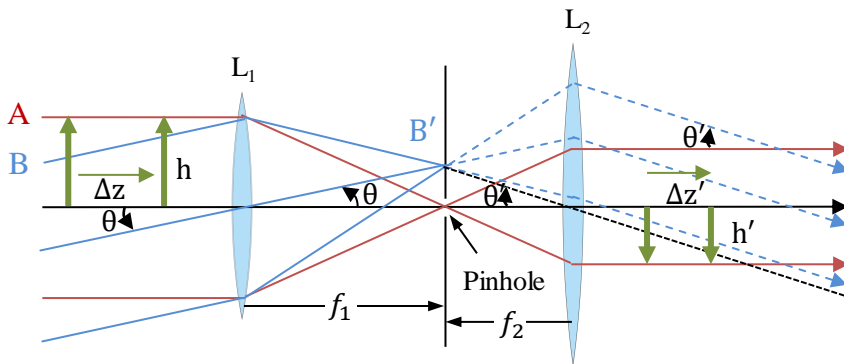


그림 2-1 무한초점 시스템 구성도

무한대에서 무한초점 시스템으로 입사하는 빛은 무한대에서 이미지를 맺는다. 무한초점 시스템의 일반적인 예로는 별을 보는데 활용하는 망원경 및 멀리 있는 물체를 보는 쌍안경 및 레이저 빔의 출력 지름을 변환하는 광선확장기(**beam expander**) 등이 있다[54].

2.2 바늘구멍 효과

바늘구멍 효과(pinhole effect)란 바늘로 뚫은 작은 구멍에 의해서 나타나는 상에 대한 효과로서, 작은 구멍을 통해 들어온 빛은 스크린의 위치에 상관없이 상을 만들게 되며, 스크린의 거리가 달라지면 상의 크기가 변하고, 밝기는 거리 제곱의 비율로 감소한다. 바늘구멍 사진기(pinhole camera)의 구멍이 완벽한 원에 가까울수록 상의 왜곡이 적다. 착란원이 형성되지 않는 정확한 상을 얻기 위한 구멍의 크기와 초점 거리에 대해서는 페츠발 요세프(Petzval József)가 처음으로 계산하였으나 오늘날에는 존 윌리엄 스트럿 레일리(John William Strutt Rayleigh)의 다음과 같은 계산식(식 2-1)[55]을 사용한다.

$$d = 1.9\sqrt{f\lambda} \quad (2-1)$$

여기서 d 는 구멍의 직경이고, f 는 초점거리, λ 는 빛의 파장이다. 제작한 AOFS의 바늘구멍과 이미지센서 간 거리는 0.01 m 이고, 가시광선의 파장대는 399 nm ~ 780 nm 이므로 위 식에 대입하면 구멍의 직경은 120 μm ~ 168 μm 일 경우, 좀 더 정확한 상을 얻을 수 있다.

그림 2-1의 광선 ‘A’ 처럼 렌즈 광축에 평행하게 입사한 광선은 그 렌즈의 초점을 지나는데, 무한초점시스템에서 바늘구멍을 두 렌즈의 초점이 일치하는 곳에 위치시킬 경우, 광축과 평행한 입사광만 바늘 구멍을 통과하여 이미지

평면(screen)에 상을 맺게 된다. 광축과 평행하지 않은 광선 ‘B’ 는 구멍이 존재하는 평면에 의해 차단되므로 선명한 이미지를 얻을 수 있다. 구멍이 작을수록 구멍을 통과하는 전체적인 광량은 줄어들어 AOFS가 바닥 표면 무늬를 인식하기 어려워지므로 구멍이 작아지는 만큼 더 강한 조명을 바닥에 조사해야 한다. 반대로 구멍 크기를 키울수록 최종 획득한 이미지는 밝아지지만 번짐 현상에 의해 이미지가 불분명하게 된다.

식 2-2를 보면 입출력 영상 간 종배율은 오직 두 렌즈의 초점 거리의 비로만 결정된다.

$$m = \frac{f_2}{f_1} = \frac{h'}{h} \quad (2-2)$$

여기서 m 은 종배율이고, f_1 은 렌즈 1의 초점거리, f_2 는 렌즈 2의 초점거리, h 는 입력 이미지 속 물체의 종축 길이, h' 은 출력 이미지 내 해당 물체의 종축 길이이다.

2.3 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 프로토타입

본 논문에서는 OFS로 ADNS-3080(그림 2-2)[56]을 사용했다. 일반적으로 광학흐름센서는 저해상도 카메라와 디지털 신호처리 장치가 내장되어 있으며, 카메라로 촬영한 연속 이미지를 분석하여 미세 패턴이 움직인 상대 변위를 추정하는 알고리즘이 프로그램되어 있다[57]. OFS는 발광다이오드로 빛을 바닥 표면에 조사한 후 반사된 이미지를 분석하여 이동거리를 추정한다. 만약, 바닥 표면에 불규칙성이 거의 없거나 충분하게 빛이 반사되지 않는 유리 같은 경우에는 동작이 보장되지 않는다. OFS는 주로 CMOS 카메라를 사용하며, 하나의 칩에 카메라와 디지털 신호처리 장치가 집적되어 있으며 이동 변위를 계산하기 위해 일련의 영상 매칭을 통해 영상흐름(optical flow)을 추정한다(그림 1-7)[58].

광마우스 단면도(그림 1-6)를 보면 크게 다음과 같이 세 부분으로 나뉘는데 OFS 칩, 표면을 밝게 비추는 발광다이오드, 발광다이오드에서 방출된 빛을 바닥에 골고루 퍼지게 해주는 플라스틱 렌즈 및 바닥에서 반사된 빛이 광학흐름센서에 잘 도달하도록 모아주는 볼록렌즈가 하나의 투명 플라스틱

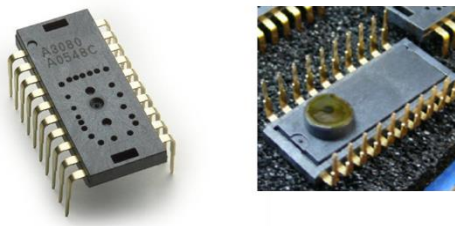


그림 2-2 광학흐름센서 ADNS-3080 사진

구조물로 형성되어있다.

이 세 부분의 조합으로 구성된 일반적인 광학식 마우스는 굉장히 낮은 높이(2.3 mm~2.5 mm)에서 초점이 잘 맞은 이미지를 획득하는 용도에 최적화되어 있으며, 좀 더 긴 초점거리를 갖는 렌즈로 변경할 경우 이 동작 높이는 증가할 수 있다. 본 논문에서 사용한 ADNS-3080[56]은 30×30 픽셀 크기의 회색 이미지를 획득할 수 있는 영상 소자를 포함하고 있다. ADNS-3080의 경우 2.4 mm의 높이에서 평평한 바닥 표면 약 $1.82 \text{ mm} \times 1.82 \text{ mm}$ 영역의 이미지를 초당 2,000 장에서 6,496 장까지 획득하여 이미지 간의 이동 변위량을 추정할 수 있다. ADNS-3080이 가지고 있는 표준 SPI 통신 방법으로 OFS 칩 내부 레지스터의 값을 읽거나 쓸 수 있으며, 이를 통해 OFS의 동작을 제어할 수 있다.

무한초점시스템이 적용된 AOFS 모듈(그림 2-3)은 0.5 mm 직경의

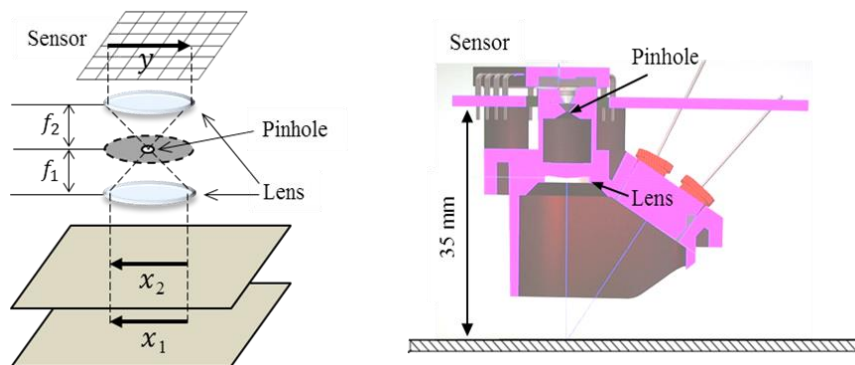


그림 2-3 AOFS 모듈의 구조(좌) 및 단면도(우)

바늘구멍과 10 mm 초점거리를 갖는 렌즈(그림 2-1 의 L1)와 그림 2-1 의 L2 렌즈를 ADNS-3080의 이미지 소자로 대체하여 구성했다. L2 렌즈의 역할은 렌즈를 통과한 광선을 렌즈 광축과 평행하게 해주어 L2 렌즈와의 거리에 관계 없이, 시스템을 통과한 상의 크기를 일정하게 유지시켜 주는 역할을 하므로, OFS의 이미지 소자로 대체하여도 성능에는 영향이 없다. 구멍이 너무 작아 AOFS가 바닥의 영상을 인식하기에는 광량이 부족하므로, 발광다이오드 4개를 사용하여 영상의 밝기를 향상시켰다[59]. ADNS-3080이 초당 6,400 장의 이미지를 촬영하도록 설정했으며, 움직인 거리에 따라 취득되는 카운트 수는 mm 당 63 카운트로 설정했으므로, 1 카운트는 $31.75\ \mu\text{m}$ 에 해당한다.

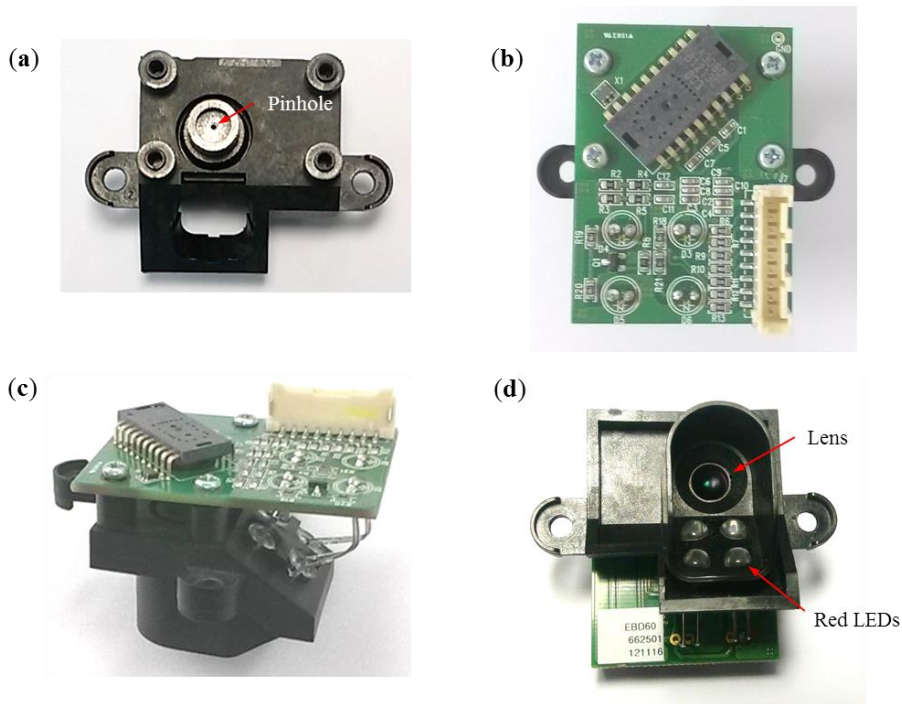
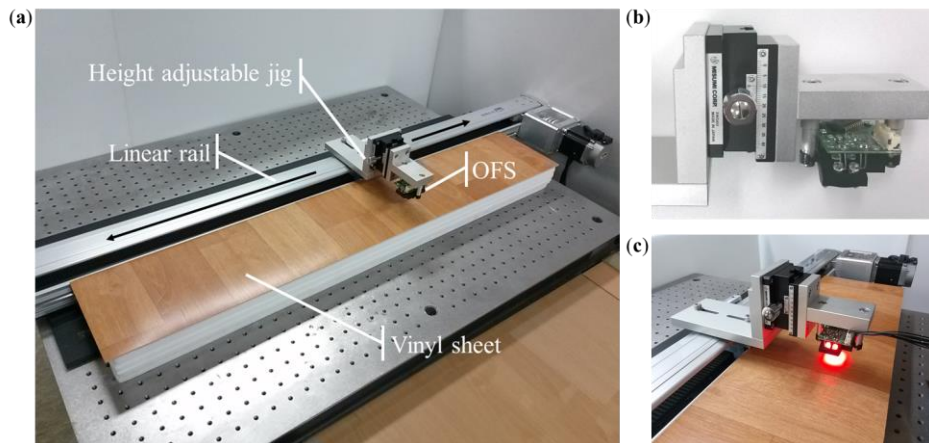


그림 24 AOFS 모듈 사진

제작한 AOFS 모듈을 다른 각도에서 촬영한 사진을 그림 2-4에 나타냈다. 그림 2-4a는 바늘구멍이 보이는 사진이고, 그림 2-4b는 ADNS-3080 OFS칩을 보여주며, 그림 2-4c는 AOFS 모듈의 투시도이고, 그림 2-4d는 렌즈와 LED를 나타낸다.

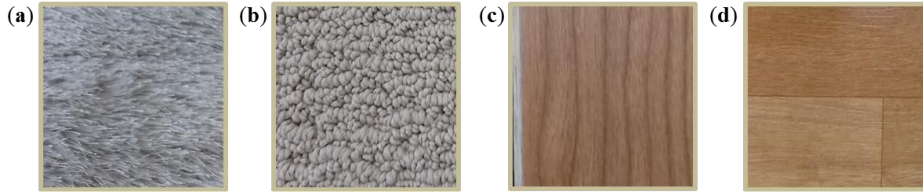
2.4 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 실험 계획

바닥과 센서간 거리를 미세하게 조정하고 일정한 거리를 정확히 움직일 수 있도록, 센서 높이 조절용 지그(XWG60, Misumi, 도쿄, 일본)[60]와 벨트 기반 선형 구동기(belt-driven linear actuator, DRSB99SL40-ST1000, Dream Robot System, 인천, 한국)[61]로 구성된 로봇 문형 시스템(robotic gantry system)을 사용했다(그림 2-5). 선형 구동기의 반복 정밀도는 $20\ \mu\text{m}$ 이며 정확도는 $50\ \mu\text{m}$ 이고 최고 속도는 $1000\ \text{mm/s}$ 이다. 선형 구동기의 최대 이동거리가 $100\ \text{cm}$ 이므로 실험에서의 이동거리는 $80\ \text{cm}$ 로 설정했다. 센서 높이를 정밀하게 조정하기 위하여 래크와 피니언(rack and pinion) 형태의 위치설정기를 사용했다[35]. 마이크로 제어장치(microcontroller)인 마이크로칩(Microchip)사의 16비트 DSP인 dsPIC33FJ256[62]을 사용하여 ADNS-3080 칩과 SPI 통신으로 AOFS 모듈로부터



(a) 로봇 문형 시스템; (b) 높이조절 지그; (c) AOFS 모듈 활성화 상태

그림 2-5 AOFS 모듈 실험 장치



(a) 텍스처 스타일 카펫; (b) 루프 스타일 카펫; (c) 강화마루; (d) 비닐 장판

그림 2-6 실험에 사용된 바닥 재질

20 ms 마다 이동 변위 정보를 획득했다.

AOFS 모듈을 이동 로봇에 장착하고 실내환경에서 주행할 경우, 로봇 자체의 현가장치(suspension)를 제외한 센서 높이 변화의 주요 요소는 카펫, 문턱, 울퉁불퉁한 바닥 및 책과 같은 높이가 낮은 장애물 등이다. 제작된 AOFS 모듈이 이러한 환경에서 적용가능한지 확인하기 위해, 서로 다른 네 가지 종류의 바닥재질에서 센서 높이를 달리하면서 이동 변위 획득 성능을 실험했다. 바닥 종류는 그림 2-6 처럼, 텍스처 스타일 카펫(texture-style carpet), 루프 스타일 카펫(loop style carpet), 강화마루, 비닐장판이다. AOFS와 실험용 바닥재 표면 사이의 높이를 30 mm 에서 50 mm까지 5 mm 간격으로 변화하면서, AOFS 모듈은 로봇 문형 시스템에 장착하여 35 cm/s의 속도로 80 cm의 거리를 이동시키면서 AOFS가 인식하는 이동거리를 측정했으며, 같은 높이에서 10번씩 반복했다.

다음으로는 AOFS를 실내 이동 로봇인 LG전자 로보킹(그림 2-7)에 장착하여 루프 스타일 카펫(그림 2-6b)에서 1 m 거리를 이동시키며 실험했다.



그림 2-7 AOFS가 장착된 이동로봇

루프 스타일 카펫의 높이 변화가 다른 바닥재질 대비 가장 크므로, 이 카펫을 대표로 선택했다. 루프스타일카펫의 높이 변화는 그림 2-8에 나타냈다. 표면 윤곽은 레이저 거리 센서(DLS-B 30, DIMETIX, Herisau, 스위스)[60]로 측정했으며 측정 분해능은 0.1 mm 이고 앞서 실험과 동일한 로봇 문형 시스템을 이용하여 이 레이저센서를 0 mm 부터 200 mm 까지 1 mm 씩 움직이면서 표면 윤곽을 측정했다. 평균 높이와 표준편차는 각각 86 mm 와 8.7 mm 였다. AOFS가 장착된 이동로봇을 루프 스타일 카펫 위에서 손으로 움직인 후 평균 주행거리추정 에러와 표준편차를 계산했다.

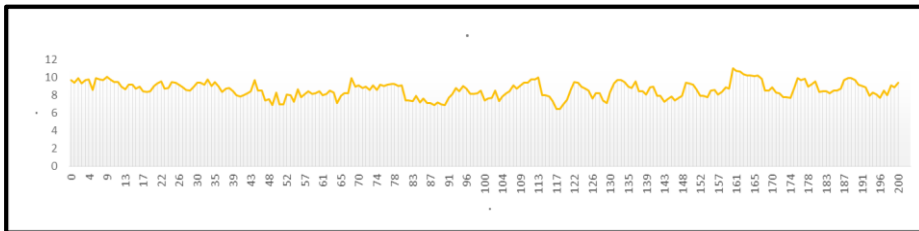


그림 2-8 레이저로 측정한 루프 스타일 카펫의 표면 높이 변화

그 다음 실험으로는 로봇이 루프 스타일 카펫이 깔린 실험 공간(그림 2-9)에서 가로 2 m, 세로 1.5 m 의 직사각형 궤적을 20 바퀴 주행하도록 프로그래밍한 후, 휠 엔코더, 각속도 센서 조합과 휠 엔코더, 각속도 센서, AOFS 센서를 조합했을 경우의 위치 추정 성능을 비교했다. 로봇 궤적을 객관적으로 측정(ground truth)하기 위해 바이콘 모션 인식 시스템(motion capture system, VICON, 영국)[63]을 사용했다(그림 2-11, 그림 2-10). 모두 8개의 Vantage V5 모션 캡처 카메라를 실험 공간에 설치했으며, 이 카메라는 로봇에 장착된 적외선 반사 마커를 추적하여 로봇의 위치를 0.5 mm 오차 이하로 계산한다. 로봇이 5 cm 이동하거나 각도가 30 도씩 변할 때마다 로봇의 위치를 측정하여 로봇에 연결된 USB 메모리 스틱에 저장한 후, 주행이 완료되면 컴퓨터로 옮겨 바이콘 시스템에서 획득한 데이터와 비교하여 위치 오차를 측정했다.



그림 2-9 카펫이 설치된 실험 공간



그림 2-11 바이콘 모션 인식 시스템이 설치된 실험 공간

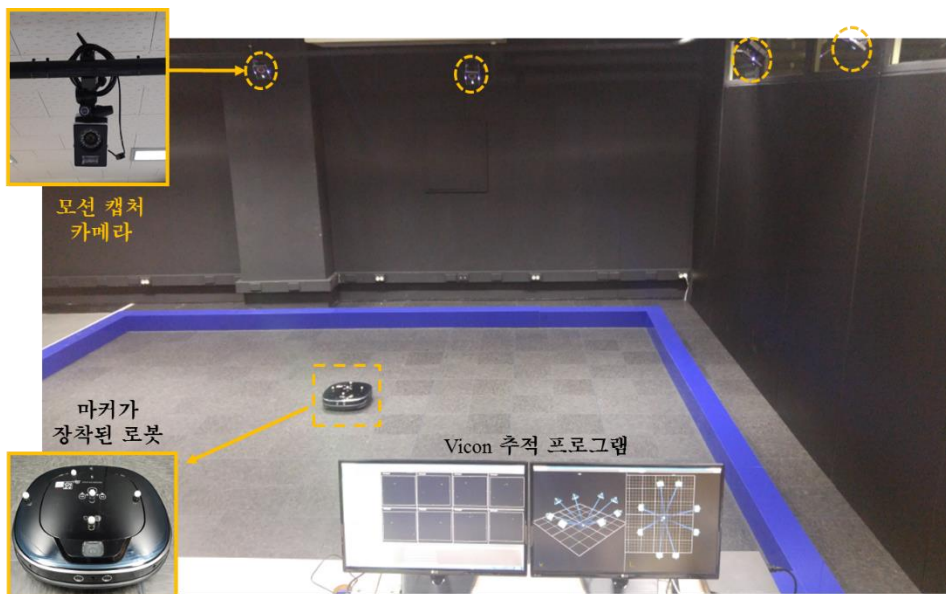
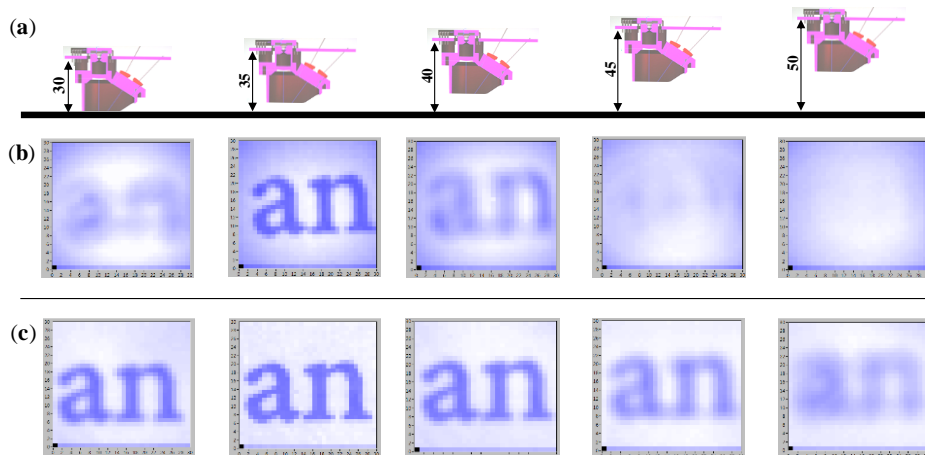


그림 2-10 바이콘 모션 캡처 카메라 및 적외선 마커가 장착된 로봇

2.5 무한초점 광학흐름센서(AOFS) 모듈 실험 결과

첫번째 실험은 제작된 AOFS 모듈이 바닥과의 높이 변화에 무관하게 선명한 영상을 출력하는지 확인했다. ‘an’이라는 단어를 엠에스 워드(MS Word)로 글자크기 9 포인트, 타임스 뉴 로만(times new roman) 서체로 A4 용지에 출력하여, 바늘구멍이 적용된 AOFS 모듈과 바늘구멍이 적용되지 않은 일반 OFS로 이미지를 높이 별로 촬영하여 선명도를 비교했다. 그림 2-12에서 알 수 있듯이 센서의 높이를 30 mm 에서 50 mm 까지 5 mm 간격으로 변화하면서 영상을 획득한 결과, 바늘구멍이 적용된 센서의 이미지가 더 선명함을 알 수 있다. 참고로, 비교 실험에 사용된 기존의 OFS 모듈은 35 mm 에 최적화되어 있다.

핀홀이 적용된 AOFS와 핀홀이 적용되지 않은 OFS로 네 가지 바닥재질에서



(a) mm 단위 센서 높이;

(b) 기존 방식의 OFS로 획득한 영상; (c) AOFS로 획득한 영상

그림 2-12 센서 높이 별 획득된 영상

센서 높이를 달리하면서 평균 이동거리와 표준편차를 측정한 결과를 그림 2-13에 정리했으며, 표 2-1에 상세 수치를 명기했다. 결과에서 알 수 있듯이 AOFS는 센서 높이가 30mm~40mm 영역에서 1mm 변화하면 0.1%의 거리 추정

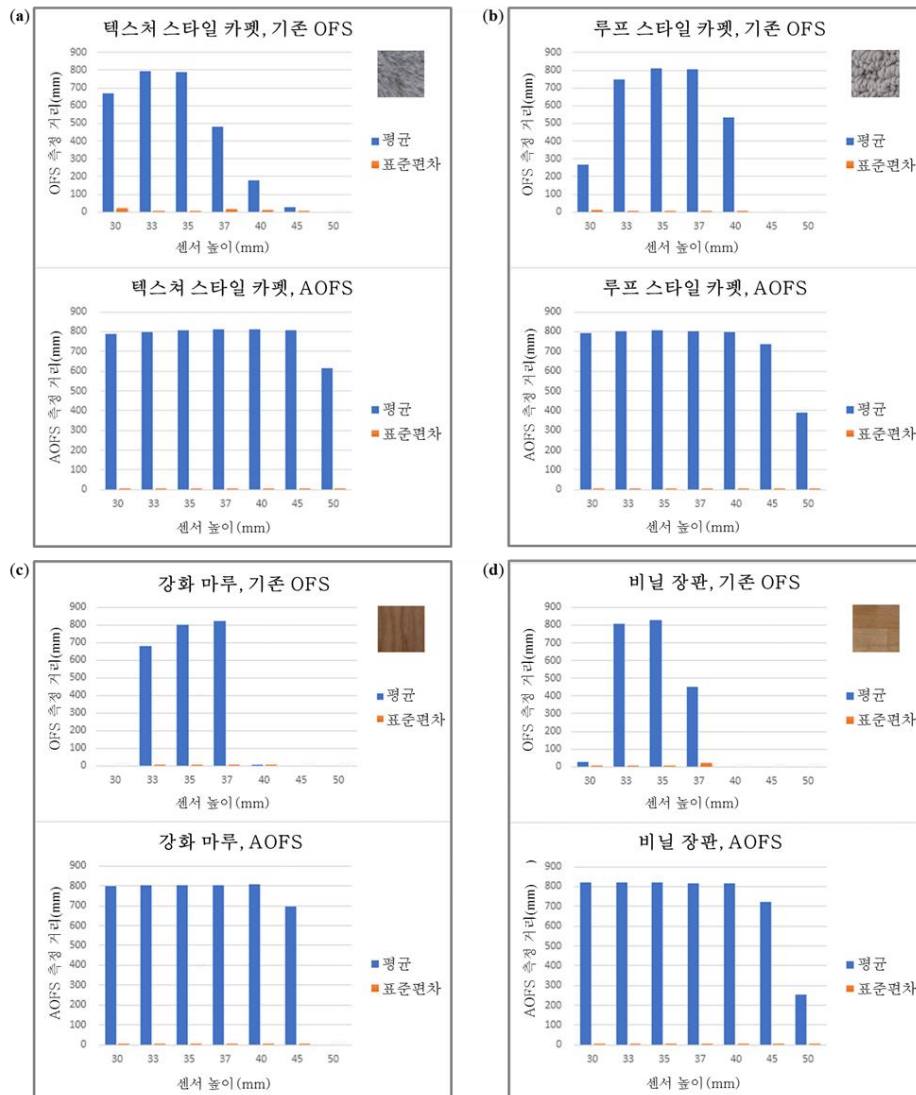


그림 2-13 바닥재 종류 별, 센서 높이 별 10번 반복 측정 평균 및 표준편차

오차가 발생하지만 기존 방식의 OFS는 14.7%의 거리 추정 오차를 보인다. 표 2-1을 보면, AOFS의 높이가 40 mm 이상으로 높아지게 되면, 오차가 증가함을 알 수 있는데, 이것은 바늘 구멍 크기가 이상적으로 0이 될 수 없으며, 센서 모듈에 장착된 발광다이오드와 바닥 간 거리가 멀어지게 되면서 표면 조도가 어두워짐에 따라 발생하는 현상으로 보인다. 본 실험에 사용한 이동로봇의 하단 부분과 바닥과의 거리가 10 mm 이므로 실험 결과를 볼 때, 이 정도의 동작범위에서는 충분히 활용 가능한 것으로 판단된다.

다음으로 AOFS를 로봇에 장착하여 루프 스타일 카펫 위에서 1,000 mm를 10번 반복 이동하면서 추정된 평균 거리와 표준편차를 구한 결과 평균 거리는 1000.2 mm 로 0.02%의 거리 오차를 보였으며, 표준편차는 17.6을 나타냈다. 반면, 기존의 OFS로 실험한 결과 평균 거리는 959.1 mm 로서 4.09%의 거리 오차를 보였고, 표준편차는 25.7을 나타냈다(표 2-2).

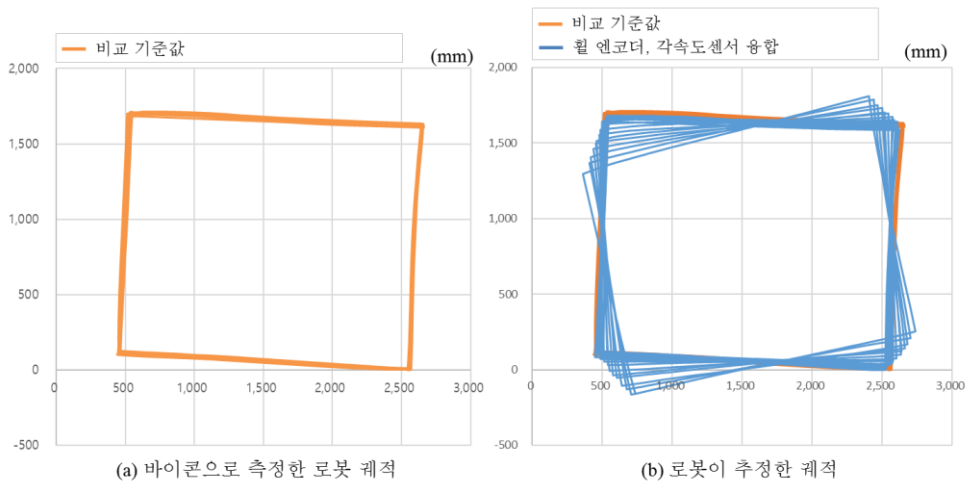


그림 2-14 카펫이 없는 환경에서 휠 엔코더와 각속도센서로 추정된 로봇 궤적

다음 실험으로는 로봇을 바이콘 시스템이 설치된 실험 공간에서 카펫을 설치하지 않고 1.5 m × 2.0 m 직사각 영역 외곽을 따라 20바퀴 주행하면서 휠 엔코더와 각속도센서로 위치를 추정한 결과는 그림 2-14와 같으며 위치 오차 평균은 175 mm, 표준편차는 114 mm 이며 최대 오차는 481 mm 를 나타냈다. 미끄러짐이 거의 없는 상황에서는 휠 엔코더로 추정한 주행거리도 비교적 정확하나 회전을 많이 할 수록 각속도 센서로 측정한 각도가 점점 틀어짐을 알 수 있다. 하지만, 카펫을 설치했을 때는 그림 2-16 처럼, 바퀴 미끄러짐에 의해 최대 위치 오차는 10,346 mm을 나타냈다. 그림 2-15 처럼, 카펫환경에서도 휠 엔코더와 각속도센서 외 본 논문에서 제안한 AOFS를 추가로 활용하면 위치 오차 평균은 255 mm, 표준편차는 198 mm, 최대 오차는 873 mm 로 AOFS를 사용했을 경우 10,346 mm 에서 873 mm 로 약 12배 개선됨을 확인했다. 위치 오차의 성분을 분석해 보면 AOFS에 의한 주행거리 추정 오차라기보다는

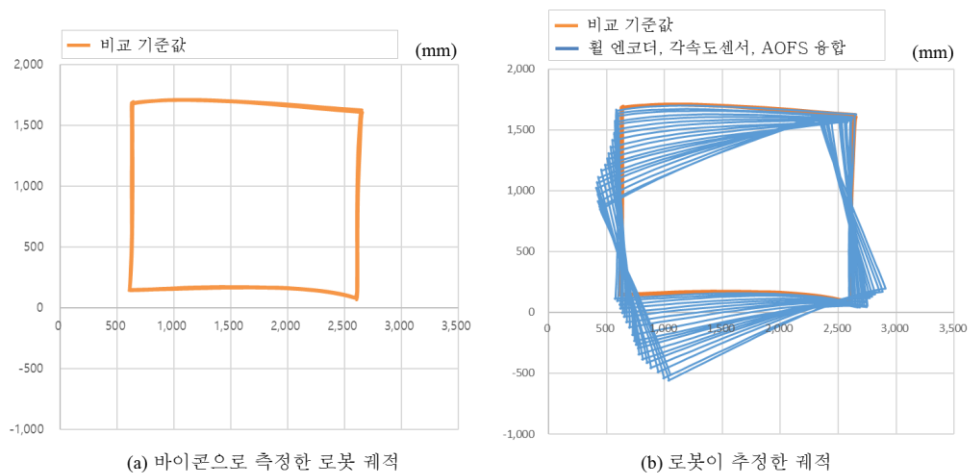


그림 2-15 카펫 환경에서 휠 엔코더, 각속도센서,AOFS로 추정한 로봇 궤적

각속도 센서의 오차가 누적되면서 위치 오차가 발생한 것으로 판단된다.

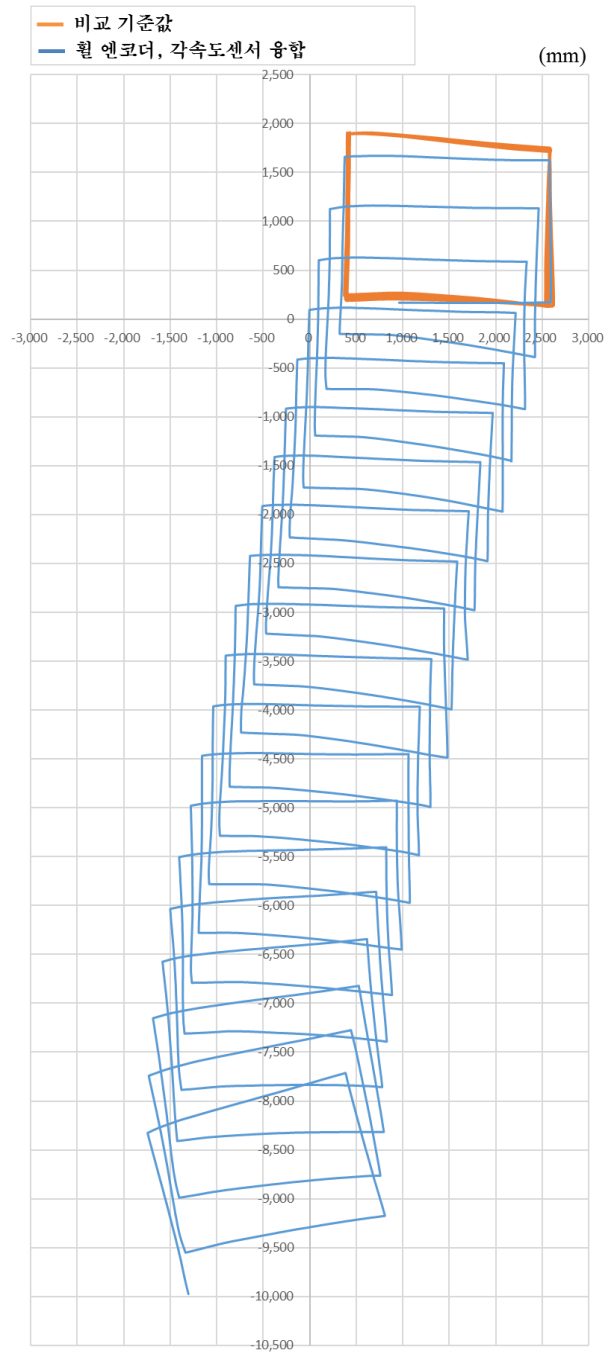


그림 2-16 카펫 환경에서 휠 엔코더와 각속도센서로 추정한 로봇 궤적

표 2-1 다양한 재질에서 센서 높이 별 이동거리 인식 비교표

바닥 재질	높이 (mm)	기존 OFS 모듈			AOFS 모듈		
		평균 (mm)	표준편차	오차 (%)	평균 (mm)	표준편차	오차 (%)
강화 마루	30	0	0	100.0	799	0.9	0.1
	33	678	2.9	15.3	802	0.9	0.2
	35	802	0.4	0.3	804	0.8	0.5
	37	823	0.7	2.9	805	0.7	0.6
	40	8	1.4	99.0	806	0.5	0.8
	45	0	0	100.0	694	2.9	13.3
	50	0	0	100.0	0	0.0	100.0
비닐 장판	30	29	2.4	96.4	820	0.4	2.5
	33	809	2.2	1.1	820	0.5	2.5
	35	827	0.6	3.4	820	0.6	2.5
	37	452	22.1	43.5	819	0.7	2.3
	40	0	0	100.0	817	0.7	2.1
	45	0	0	100.0	722	2.4	9.8
	50	0	0	100.0	253	2.4	68.4
텍스처 스타일 카펫	30	671	20.6	16.1	789	2.6	1.4
	33	796	6.5	0.5	799	1.6	0.2
	35	790	6.8	1.3	808	0.6	1.0
	37	482	18.3	39.8	810	0.6	1.3
	40	179	9.1	77.6	812	0.5	1.5

	45	28	4.7	96.5	807	1.5	0.9
	50	0	0	100.0	614	4.4	23.3
루프 스타일 카펫	30	267	9.5	66.6	794	0.5	0.8
	33	749	2.3	6.4	802	0.4	0.2
	35	810	0.3	1.3	809	0.3	1.1
	37	803	1.6	0.4	804	0.5	0.4
	40	532	3.4	33.5	798	0.6	0.3
	45	0	0	100.0	737	1.8	7.9
	50	0	0	100.0	390	5.9	51.3

표 2-2 루프 스타일 카펫 위에서 로봇 1 m 주행 시 위치 추정 결과

Conventional fixed-focal-length OFS module			Proposed afocal OFS module		
Mean (mm)	Standard deviation	Error (%)	Mean (mm)	Standard deviation	Error (%)
959.1	25.7	4.09	1000.2	17.6	0.02

제3장 저조도영상의 방위각보정 활용방법

3.1 저조도 영상 개선 방법

저조도 영상을 개선하기 위해, 입력 영상의 명도 평균을 구한 후 특정 값 이하일 경우 저조도 영상이라 판단하고, 히스토그램 평활화 알고리즘을 적용한 후 이어서 롤링 가이드선 필터[52]를 통과 시켰다. 앞서 기술한 것처럼 저조도 영상에 히스토그램 평활화 알고리즘을 적용하면 잡음이 강하게 나타나게 되는데, 이렇게 발생하는 영상 잡음을 없애면서 영상 내 경계 부분을 선명하게 하기 위해 롤링 가이드선 필터링을 적용하는 방법을 제안했다. 그림 3-1(a) 는 조명을

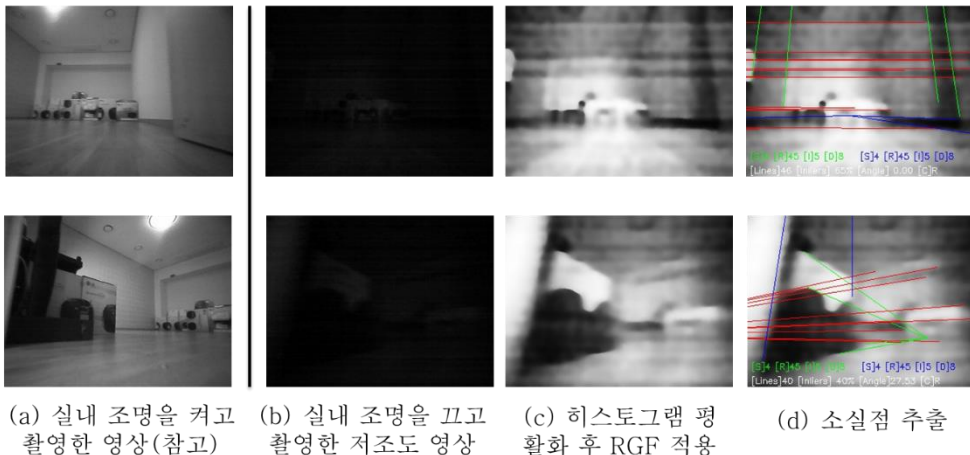


그림 3-1 저조도 영상 개선 후 실내공간 구조를 추출한 영상

켜고 촬영한 실내 영상이며, 그림 3-1(b) 는 조명을 소등했을 때 영상이고, 그림 3-1(c)는 저조도 영상에 히스토그램 평활화 적용 후 롤링 가이드스 필터링을 적용한 결과 히스토그램 평활화에 의한 잡음이 사라짐을 볼 수 있다.

롤링 가이드스 필터의 원리를 그림 3-2 에 나타냈다. 입력 영상의 잡음을 제거하기 위해 가우시안 필터를 적용하여 영상을 부드럽게 처리하고(J^1), 최초 입력 영상의 경계 부분을 활용하여, J^1 의 결과에 반영하면 경계(edge) 부분이 뚜렷해진다(J^2). 이 작업을 반복할 수록(J^3) 영상 잡음은 계속 감소하게 되고 경계는 뚜렷하게 유지된다.

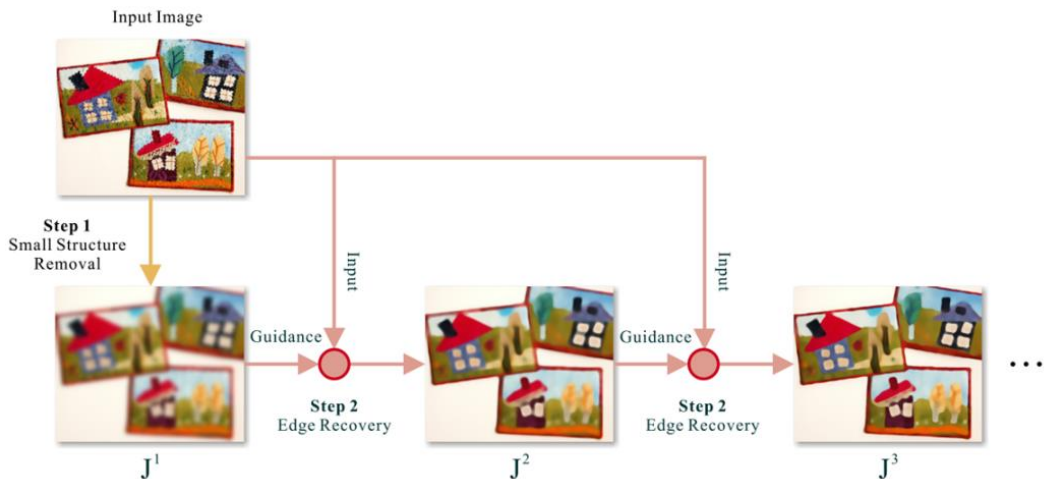


그림 3-2 롤링 가이드스 필터 원리[52]

3.2 한 장의 영상으로 실내 공간 파악 방법

일반적으로 인공 구조물 내에서는 영상 내 평행한 직선들이 존재하는 경우가 많으므로 인공 구조물 내의 직선들을 찾아 이들이 수렴하는 점을 소실점으로 찾으면, 한 장의 영상으로 실내 공간 구조를 파악할 수 있다[64]~[79]. 실내 공간에서 검출되는 선분은 주로 수직이나 수평이라는 가정을 맨하탄 프레임 가정(Manhattan frame assumption)이라고 하는데, 이 가정을 이용하여 영상에서 3개의 소실점(vanishing point, VP)을 추출할 수 있다. 소실점이란 카메라 렌즈를 통해 3차원 공간을 2차원 영상으로 투영하는 과정에서 평행한 직선들이 수렴하는 점을 의미한다. 소실점 검출은 영상 내의 정보를 이용하여 소실점의 위치를 파악하는 것을 의미하며, 영상 내 지점들의 상대적인 거리를 파악하거나 장면 전체의 3차원 구조를 파악하는데 활용된다. 그림 3-3에 소실점 추출 예시를 나타냈다. 직육면체의 경우, 이를 구성하는 선은 크게 세 방향으로 무리지어 질 수 있으며, 선을 무한대 공간으로

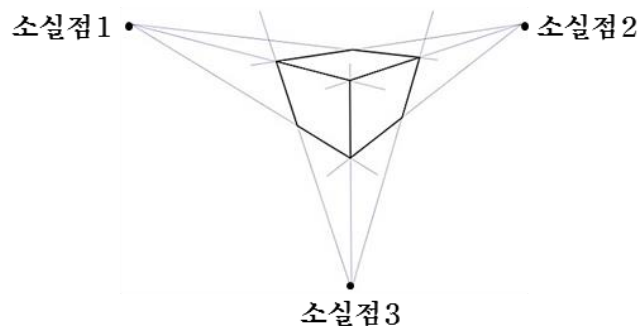


그림 3-3 영상상에서 세 개의 소실점 추출 예시

확장하게 되면 2D 평면상에 한 점으로 모이게 되며, 각 소실점은 2D 평면상에 법선 벡터로 표현할 수 있다. 또한 각 소실점은 서로 수직이므로, 두 개의 소실점을 구할 수 있다면 남은 하나의 소실점도 자연스럽게 구할 수 있다.

일반적인 실내 영상은 그림 3-3 처럼 서로 수직인 직선으로만 구성되어 있지 않고, 그림 3-4 과 같이 다양한 방향의 직선으로 구성되어 있다. 따라서, 소실점을 구성하는 직선을 추출하기 위해, 영상에서 추출한 직선들을 방향 별로 히스토그램을 계산하고 그 중 다수의 선이 공통으로 가리키는 방향에 해당하는 직선의 집합을 ‘A’ 라고 하고, ‘A’ 집합에 속하지 않는 직선의 집합을 ‘B’라고 한 후, ‘A’ 집합과 ‘B’ 집합은 서로 직교할 것으로 가정한다. 이후 RANSAC으로 직교 가정을 만족하는 선을 선택한 후 소실점을 추정한다. 이때, 직선의 소실점은 해당 직선 방향을 법선 벡터로 갖는 평면에 속해야 하며, 평면법선벡터와 선벡터의 스칼라곱(scalar product)의 결과가 임계 값 보다 작아야 한다. 그 다음으로, 레벤버그-마퀴트(Levenverg-Marquardt) 알고리즘을

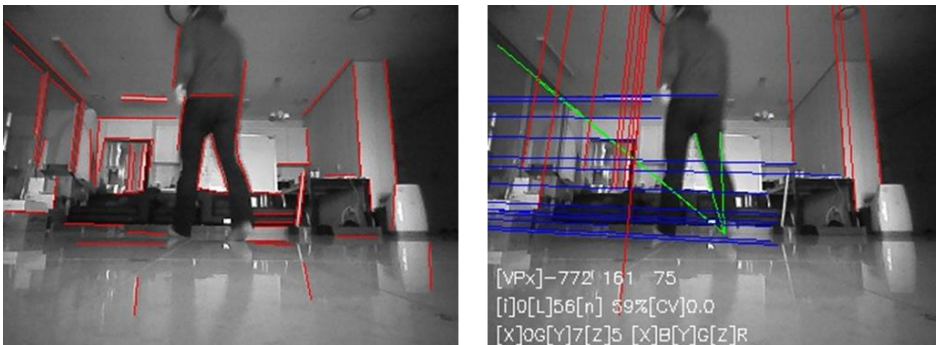


그림 3-4 직선 추출 영상(좌)과 추정 영상(우)

이용하여 에너지가 최소가 되는 소실점 벡터를 최종 선정한다. 참고로, 소실점 벡터와 평행할 것으로 판단되는 직선을 세 개 선정했을 때, 크게 세가지 형상으로 분류할 수 있다. 첫째, 세 선이 서로 수직이다. 둘째, 두 선이 평행하고 한 선은 그 두 선에 수직이다. 셋째, 세 선이 서로 평행이다. 이중 세번째 경우에는 소실점 하나는 구할 수 있으나 나머지 소실점 두 개는 무한해가 존재한다. 그림 3-4의 왼쪽 그림은 영상에서 직선을 추출한 것이고, 오른쪽 영상은 소실점을 구성하는 직선만 남기고 나머지 직선은 삭제한 영상이다.

3.3 소실점 랜드마크를 이용한 로봇 각도 추정

로봇의 카메라로 촬영한 영상을 분석하여 실내 구조가 파악되면(그림 3-5), 로봇이 실내공간 대비 상대적으로 회전된 각도를 구할 수 있다. 로봇에 전원을 인가하고 이동 명령을 내리면 움직이기 전 촬영한 전방 영상 한 장을 분석하여, 로봇이 실내 공간과 상대적으로 회전한 각도를 인식할 수 있다. 로봇이 주행하면서 각도 오차가 증가하게 될 경우, 초기 인식했던 공간과의 상대각도를 활용하여 로봇 방위각 보정에 사용할 수 있다. 로봇의 전방 카메라가 상방으로 8.7도 기울어져 있으므로, 간단한 회전 메트릭스(rotation matrix) 연산을 통해 기울기를 보정하면, 전방 카메라 기준으로 도출된 소실점이 월드(world) 기준 좌표로 변환이 된다. 로봇은 Z축 방향으로만 회전을 하므로, X 방향 계수가 가장 큰 소실점을 선정하여 로봇의 방향

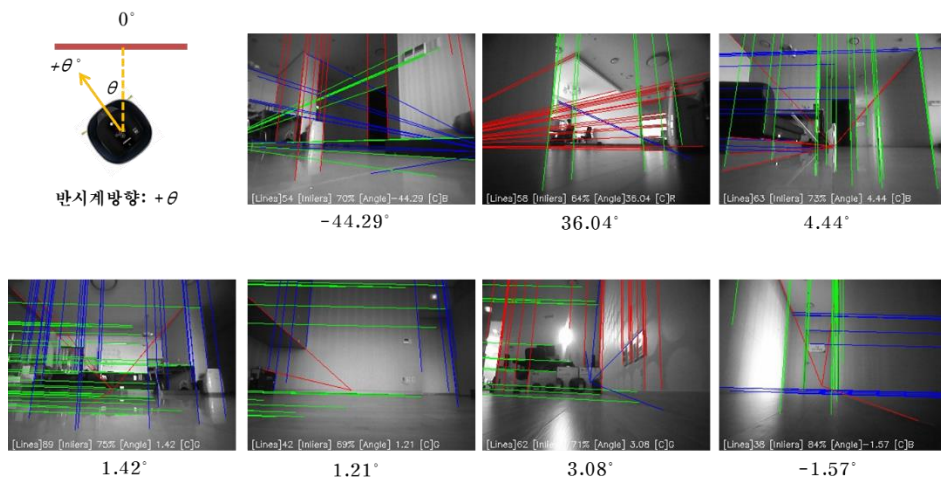


그림 3-5 실내구조 기준 로봇 상대 방위각 추정 결과

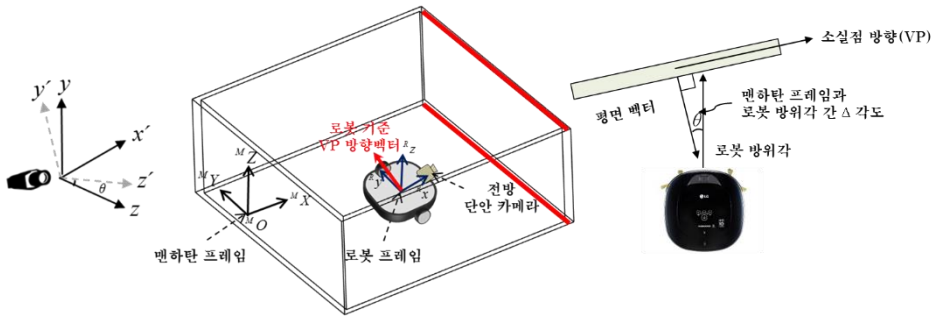
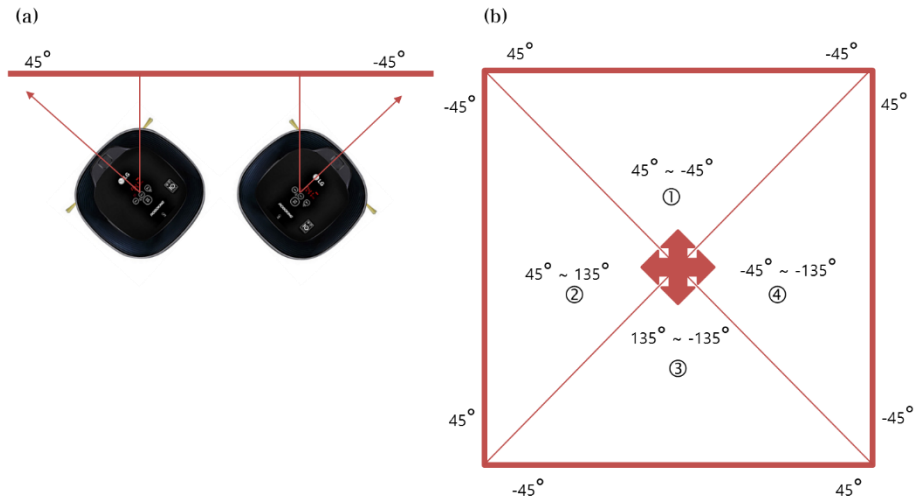


그림 3-6 로봇과 공간 좌표계 관계

벡터와의 각도 차이를 계산한다. 식 3-1에서 wVP 는 월드 기준 소실점 좌표계이고, cVP 는 전방 카메라 기준 좌표계이며, 각 x, y, z 가 의미하는 방향은 그림 3-6 에 나타났다.

$$\begin{bmatrix} {}^wVP1x & {}^wVP2x & {}^wVP3x \\ {}^wVP1y & {}^wVP2y & {}^wVP3y \\ {}^wVP1z & {}^wVP2z & {}^wVP3z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{tilt}) & \sin(\text{tilt}) \\ 0 & -\sin(\text{tilt}) & \cos(\text{tilt}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cVP1x' & {}^cVP2x' & {}^cVP3x' \\ {}^cVP1y' & {}^cVP2y' & {}^cVP3y' \\ {}^cVP1z' & {}^cVP2z' & {}^cVP3z' \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

소실점으로부터 추정된 방위각의 범위는 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 인 반면, 로봇 방위각은 $-179^\circ \sim 180^\circ$ 이다. 그림 3-7 으로부터 로봇 기준 현재 방위각이 ①, ②, ③, ④ 구간 중 어느 구간에 있는지 확인한 후, 로봇 방위각이 ② 구간에 존재 시, VP 추정 방위각에 90° 를 추가하고, 로봇 방위각이 ③ 구간에 존재하면 180° 추가, ④ 구간에 존재하면 270° 를 추가하면 맨하탄 프레임 기준 로봇의 절대각도를 알 수 있으며, 보정 전 로봇 방위각과 소실점으로 보정한 방위각과의 차이가



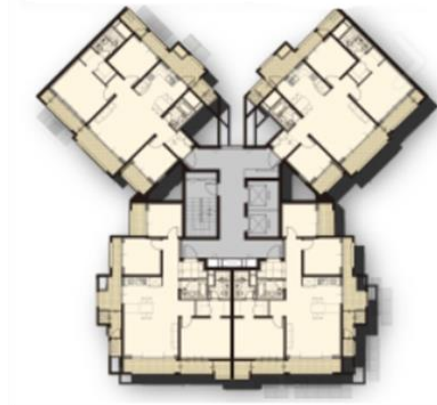
(a) 벽 기준 방위각; (b) 로봇 기준 방위각

그림 3-7 벽 기준 방위각과 로봇 기준 방위각 변환 관계도

20° 이내일 경우에만 보정된 방위각을 채택하여, 방위각 보정에 안정성을 확보할 수 있다. 지금까지 설명한 내용은 실내 환경이 단일 맨하탄



(a) 단일 맨하탄 프레임 구조



(b) 삼중 맨하탄 프레임 구조

그림 3-8 단일 및 삼중 맨하탄 프레임 구조

프레임으로 구성되었을 경우 대응이 가능하지만, 그림 3-8(b) 의 타워형 아파트 같은 다중 맨하탄 프레임 공간에서는 대응하기가 어렵다. 이러한 다중 맨하탄 공간도 대응하기 위해, 소실점을 랜드마크처럼 사용하는 방법이 있으며 구체적인 설명은 아래와 같다.

앞서 설명한 것처럼, 수평 선분들로부터 추출된 소실점의 방향 벡터를 이용하면, 로봇과 로봇 전방의 수평 선분과의 상대 각도인 ${}^M_R\theta_{VP}$ 를 계산할 수 있다. 랜드마크로 사용하기 위한 소실점의 월드 기준의 각도는 식 3-2 와 같이 계산할 수 있다.

$${}^W\theta_{VP} = {}^M_R\theta_{VP} + {}^W\theta_{R,k} \quad (3-2)$$

이때, ${}^W\theta_{R,k}$ 는 현재 로봇의 각도이다. 다수의 월드 기준의 소실점의 각도 샘플이 확보되면, 이를 평균한 각도인 ${}^W\bar{\theta}_{VP}$ 를 데이터베이스에 저장한다. 이

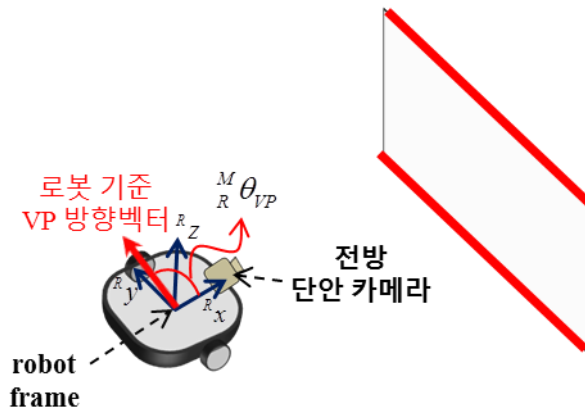


그림 3-9 로봇과 공간 관계 예시

때, 기존에 저장된 소실점 랜드마크와 일정 각도 이상 차이가 나는 경우에만 랜드마크로 등록한다. 그 후, 현재 영상 프레임 k 에서 검출된 소실점을 이용하여 구한 수평 선분들과의 상대 각도인 ${}^M_R\theta_{VP,k}$ 가 데이터베이스에 저장된 ${}^W\bar{\theta}_{VP}$ 와 $|{}^W\theta_{VP,k} - {}^W\bar{\theta}_{VP}| < threshold$ 의 조건을 만족하면, 데이터베이스의 랜드마크가 현재 영상 프레임에 검출된 것으로 간주한다. 이때 현재 로봇의 각도 ${}^W\theta_{R,k}$ 는 식 3-3 과 같이 계산할 수 있으며, 식이 의미하는 로봇과 공간 관계는 그림 3-9 에 나타냈다.

$${}^W\theta_{R,k} = {}^W\bar{\theta}_{VP} - {}^M_R\theta_{VP,k} \quad (3-3)$$

3.4 최종 주행기록 알고리즘

통상 로봇 자력에 의한 미끄러짐이 발생할 경우, 휠 엔코더의 변화량이 AOFS로 측정한 변화량 보다 크게 나타나게 된다. 하지만, 로봇 주행 중 외력이 작용하여 바뀌는 돌지 않아도 로봇 전체가 밀릴 수도 있으며, 특히 카펫에서 주행할 경우 카펫모의 탄성효과로 인해 측면 미끄러짐도 발생하게 된다. 따라서, 휠 엔코더 변화량과 AOFS로 측정한 위치 변화량에 일정 이상 차이가 발생하게 되면 미끄러짐이 발생했다고 판단한다. 미끄러짐이 발생하지

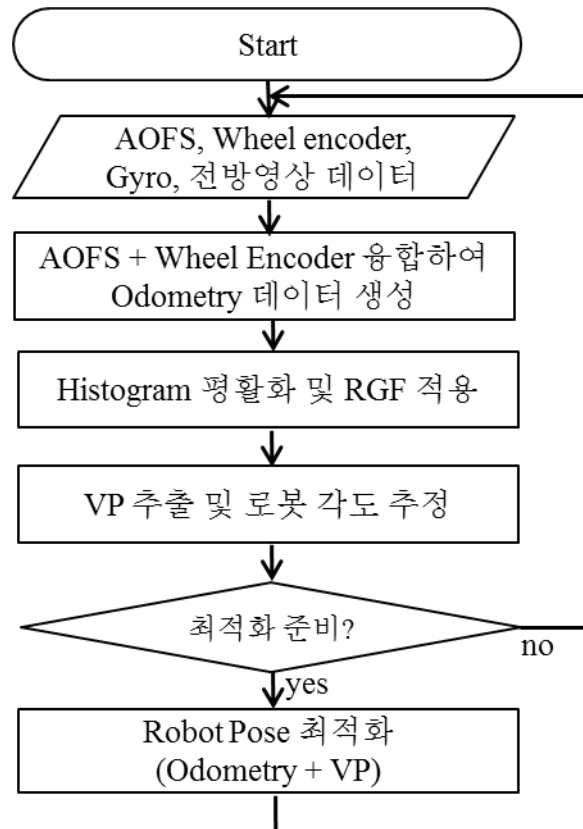


그림 3-10 최종 주행기록 알고리즘 순서도

않을 경우, 휠 엔코더의 정보가 AOFS보다 정확하며, 미끄러짐이 발생했을 경우 AOFS 로 인식한 주행 거리에 가중치를 두어 주행거리를 추정한다.

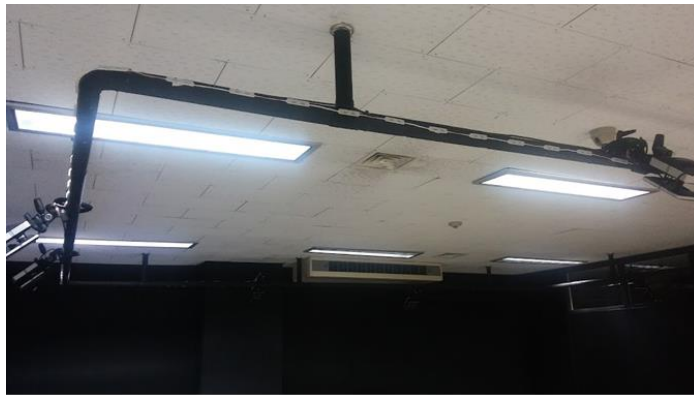
최종 주행기록 알고리즘의 순서도는 그림 3-10 와 같다. AOFS와 휠 엔코더로부터 융합된 x-y 로봇 변위 정보와 각속도 센서로부터 획득한 각도 정보가 합쳐져 연속적인 상대 위치 정보인 $\mathbf{z}_{o,i} = (\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta \theta_{gyro})^T$ 가 생성되지만, 소실점 기반 로봇의 각도 정보는 비연속적으로 입력된다. 이때, 식 3-4 와 같이 목적함수를 최소화하도록 로봇의 다수 위치를 최적화한다:

$$E(\mathbf{x}_{c,s}^w, \dots, \mathbf{x}_{c,k}^w) = \sum_i \|(\mathbf{z}_{o,i} - (\mathbf{x}_i^w \ominus \mathbf{x}_{i-1}^w))\|_{\Sigma_o}^2 + \sum_i R_i(z_{VP,s,i}^w - (\theta_i - \theta_s))^2 \quad (3-4)$$

이때, \mathbf{x}_i^w 는 i 번째 로봇의 위치이며, 변위와 각도인 $(x_i, y_i, \theta_i)^T$ 로 이루어져 있다. 최적화에는 레벤버그-마쿼트 알고리즘이 사용된다.

3.5 저조도영상의 방위각 보정 실험 계획

위치 오차를 정확히 측정하기 위해, 바이콘이 설치된 실내 공간에서 실험을 실시했다. 로봇을 $1.5\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 영역 경계를 반시계방향으로 20 바퀴 주행 시키면서 로봇이 5 cm 이동할 때 혹은 30도 회전할 때마다 휠 엔코더, 각속도 센서, AOFS 정보를 융합하여 추정한 주행기록과 전방 영상을 로깅했다. 이후,



(a) LED 조명 소등



(b) LED 조명 점등

그림 3-11 조도 조절 시스템

컴퓨터에서 이 로깅 정보를 활용하여, 영상 개선 알고리즘을 비교 실험 했다. 휠엔코더와 각속도센서, 단안 카메라를 이용한 기존 기술은 일반 조도 하에서는 오차가 적으나 저조도 미끄러운 환경에서는 오차가 발산하는 것을 보인 후, 본 논문에서 제안하는 방법을 사용했을 때에는 열악한 환경에서도 방위각 보정이 잘 이루어지는 것을 보였다.

바이콘이 설치된 실내 실험 공간의 조도를 조절하기 위해, 그림 3-11 처럼 밝기를 조절할 수 있는 LED 조명을 설치했으며, 이를 활용하여 다양한 조도 하에서 특징점 추출 및 매칭 성능을 실험한 결과를 그림 1-4 과 그림 1-5에 나타냈다. 그림 1-4 를 보면, 영상 특징점 추출 및 매칭 성능이 10 lx 정도에서도 동작함을 알 수 있으나 2 lx 수준에서는 매칭되는 특징점 수가 적어 위치오차가 발생하기 시작하며, 0.3 lx 부터는 특징점 추출 자체가 되지 않음을 알 수 있다.

3.6 저조도영상의 방위각 보정 실험 결과

일반 조도 하에서의 기존 방위각 보정 방법의 성능을 확인하기 위해, 로봇의 주행기록은 휠 엔코더, 각속도 센서, AOFS 를 융합하여 산출했고, 각속도 센서의 누적 각도 오차를 보정하기 위해 전방 영상에서 소실점을 추출하여 각도 보정에 활용했다. 바닥에 카펫을 설치하고 방위각 보정을 하지 않았을 경우, 그림 2-15 처럼 25.6 도의 각도 오차를 보였으나, 소실점을 활용한 절대 각도 보정 기법을 적용할 경우, 그림 3-12b 와 그림 3-13 처럼 각도 오차가 증가하지 않는 것을 실험 결과로 알 수 있다. 하지만, 0.15 lx 의 저조도 상태에서 같은 알고리즘을 수행할 경우 그림 3-14b 처럼 직선 추출 자체가 어려워, 각도 보정이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

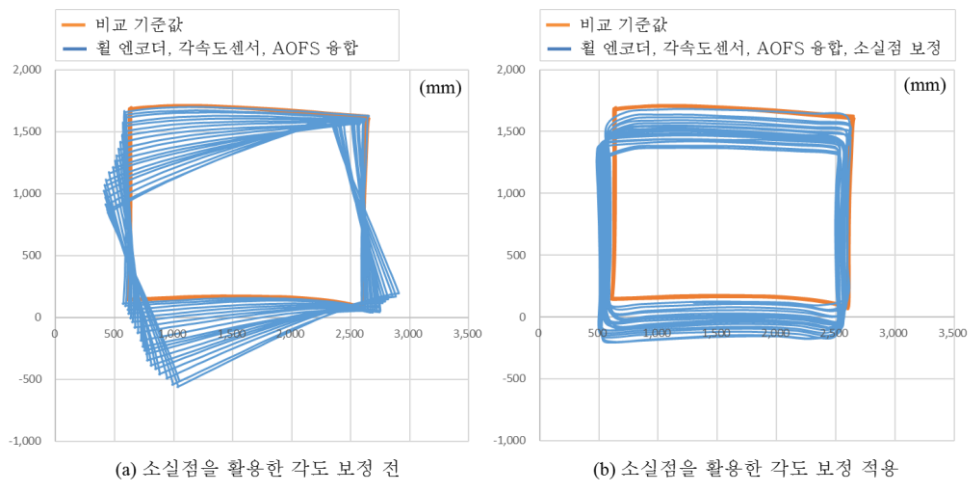


그림 3-12 조명 점등 조건에서 카펫 환경에서 휠 엔코더, 각속도센서,AOFS 융합을 통한 위치 추정 및 소실점을 활용하여 각도도 보정한 로봇 궤적

0.15 lx 의 저조도 영상을 개선하기 위해, 기존의 대표적인 방법인 히스토그램 평활화를 수행해도 그림 3-16 처럼, 추출되는 직선이 거의 없으므로 소실점 추정을 통한 각도 보정이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 하지만, 본 논문에서 제안한 방식인 저조도 영상을 히스토그램 평활화 후, 롤링 가이던스 필터까지 적용했을 경우 그림 3-15 처럼 직선 추출 및 소실점 추정을 통한 각도 보정이 발생함을 확인했다.

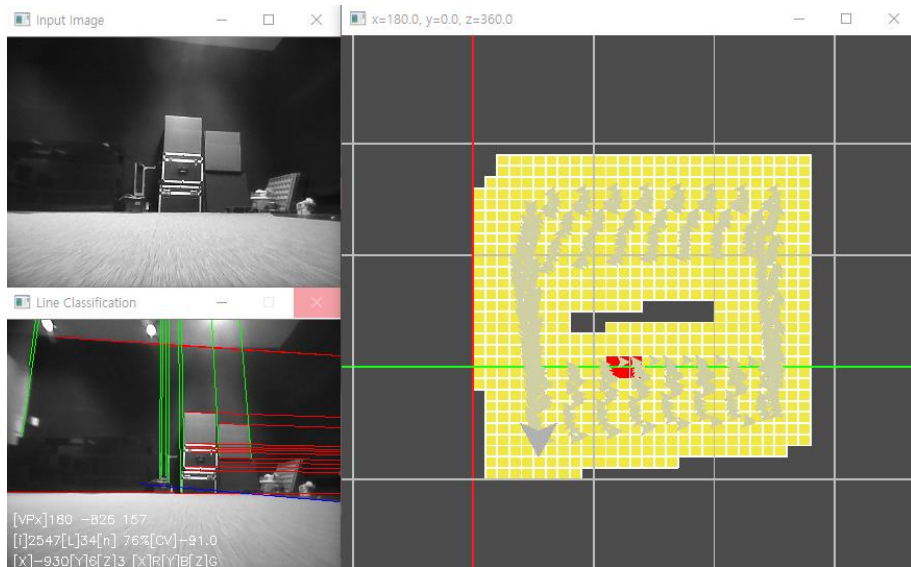


그림 3-13 조명 점등 후, 소실점을 추출한 영상(좌), 각도보정 결과(우)



(a) 조명 점등

(b) 조명 소등

그림 3-14 조명 소등 후, 직선을 추출한 영상

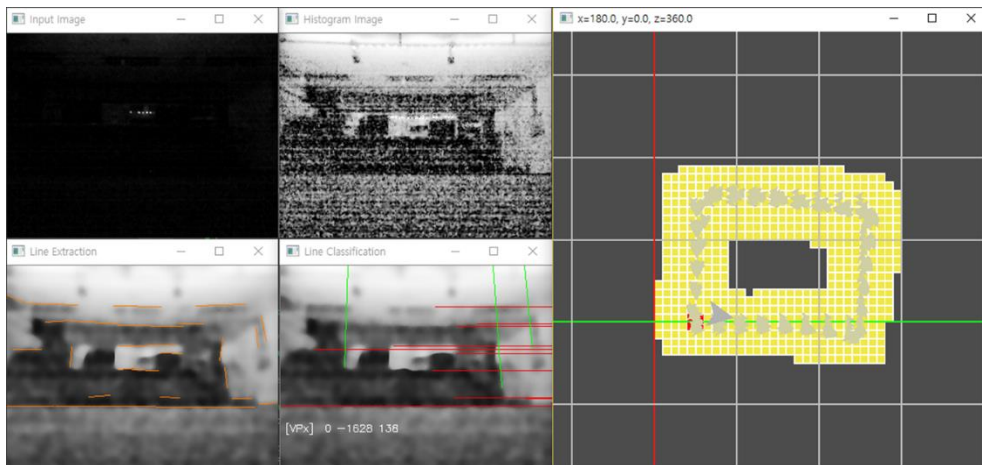


그림 3-15 어두운 영상에 히스토그램 평활화 후
롤링 가이던스 필터를 적용한 주행 결과

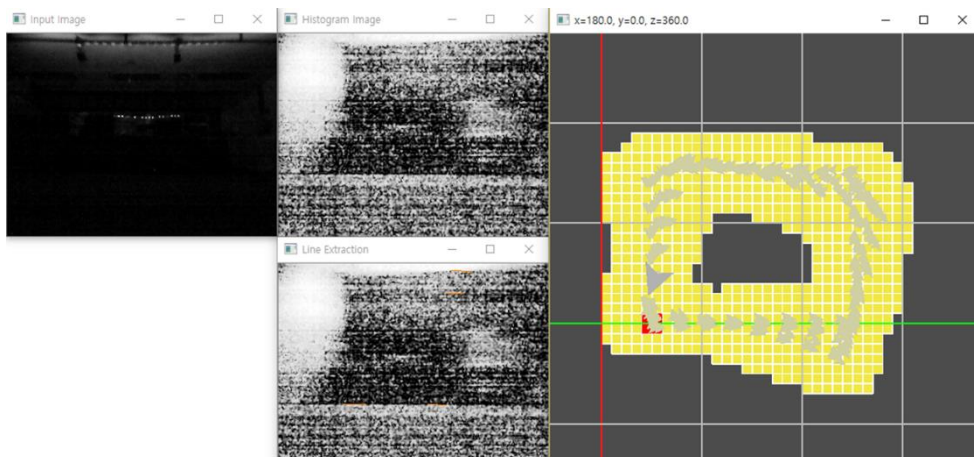


그림 3-16 어두운 영상에 히스토그램 평활화만 적용한 주행 결과

제 4 장 저조도 환경 위치인식 실험 결과

4.1 실험 환경

실내 가정환경에서 로봇(그림 4-1)을 주행 시키며 로봇 주행기록 및 전방 영상 로그를 획득하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 검증 한 후, 검증된 알고리즘을 실험용 로봇의 마이컴보드(micom board)인 Cortex A9 보드에 포팅하여 실시간 성능을 검증하는 순서로 실험을 진행했다. 알고리즘 검증 및 시뮬레이션 실험에 사용된 컴퓨터의 사양은 다음과 같다. 중앙처리장치는 인텔 i7-4790K이고, 16 GB 램(RAM)이 장착되어 있으며 운영체제는 마이크로소프트 윈도우 10 이다.

알고리즘 검증 및 시뮬레이션 실험에 필요한 로그 정보를 취득하기 위해,



그림 4-1 실험에 사용된 실내 이동로봇

그림 4-1 과 같은 실내 이동형 서비스 로봇에 전방카메라와 AOFS를 장착하고, 방 3개와 복도, 현관으로 구성된 960 cm× 800 cm 실내 가정환경 공간(그림 4-2)에 그림 4-3 처럼 카펫을 설치했다. 참고로 실험 공간 내 장애물 배치도는 그림 4-4 와 같다. 리모콘으로 방3 좌하단에서 ‘ㄱ’자 주행을 하면서 방2, 복도, 현관, 방1, 다시 제자리 원점으로 이동시키며 10 cm 이동할 때마다 또는 로봇 회전 각도가 30도 이상이 될 때마다 전방 영상과 주행기록 정보를 취득하여

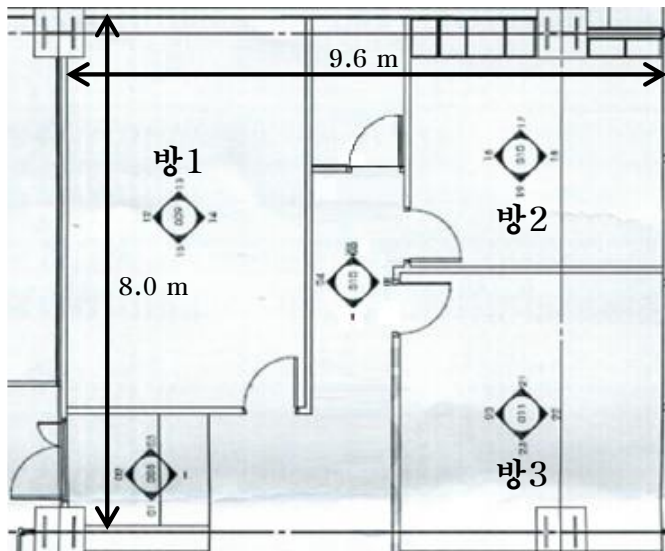


그림 4-2 실험환경 도면

로봇의 Cortex A9 보드에 연결된 USB 메모리에 저장했다. 이 때, 주행기록

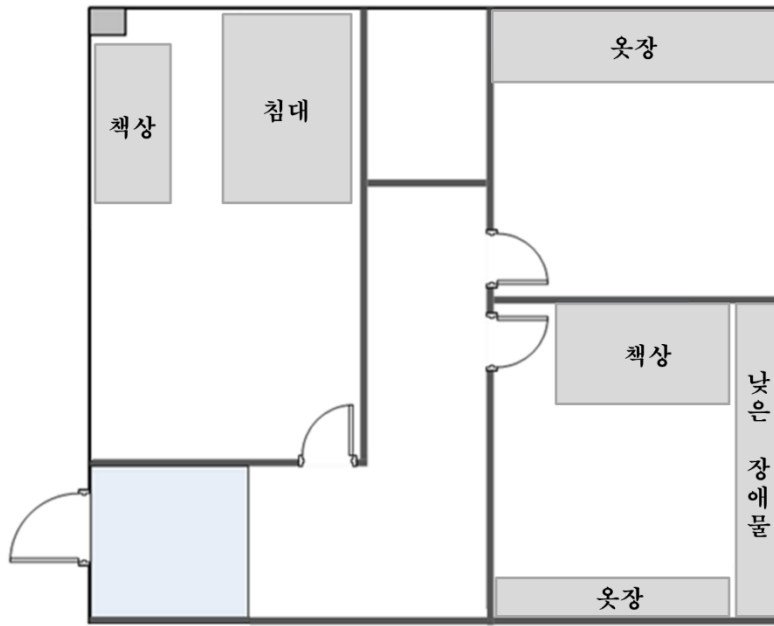


그림 44 실험환경 가구 배치도



그림 4-3 실험공간 카펫 배치도

값은 AOFS와 휠 엔코더, 각속도 센서를 융합하여 산출된 값이며 비교 실험에 사용된 주행기록은 휠 엔코더와 각속도 센서를 융합하여 산출했다.

실험은 야간에 실시했으며, 실내에 존재하는 조명은 비상등 및 출입문, 창문을 통해 들어오는 도로의 가로등 불빛만 존재하며 방 안의 모든 조명은 소등했다. 그림 4-6 처럼, 각 방 별로 이동로봇에 전방 카메라가 장착된 높이에서 조도계(DIGITAL ILLUMINACE METER, TES-1335, TES, 대만)[80]를 이용하여 조도를 측정한 결과 방1은 0.21 lx, 방2는 0.07 lx, 방3은 0.06 lx, 복도에서 출입문 방향은 0.19 lx, 복도에서 작은방 방향은 0.08 lx 임을 측정을 통해 확인했다(그림 4-5). 비교 실험군으로는 로봇 분야에서 권위있는 학술지인 IEEE Transactions on Robotics(T-RO)의 인기있는 논문 1위(2017년 2월 통계 기준)로 선정된 단안 카메라 기반의 ORB-SLAM[21][81][82]을 사용하여

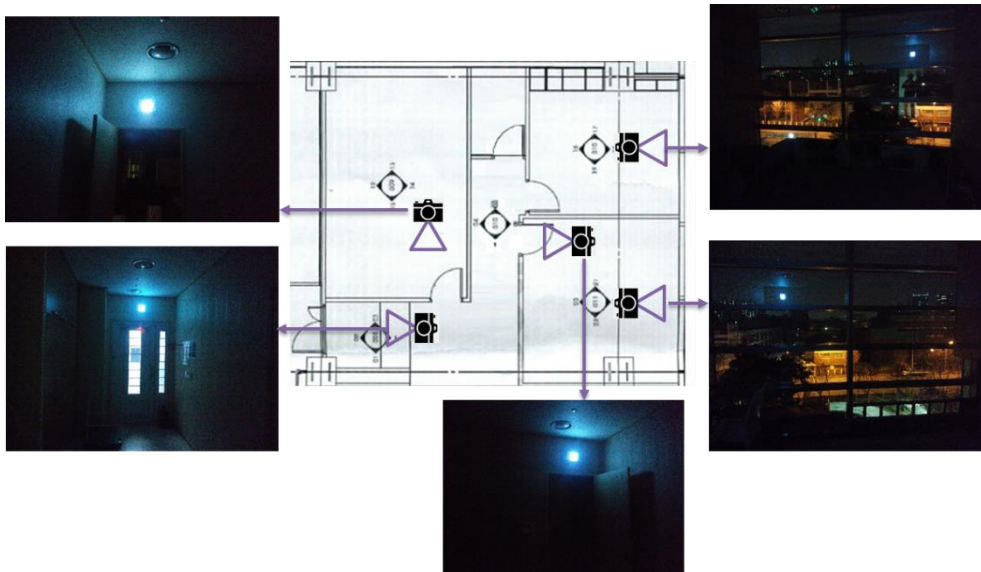


그림 4-5 저조도 실내 환경 사진

본 논문에서 제안하는 방법과 실험결과를 비교했다. ORB-SLAM은 코드가 공개되었으며, 단안 카메라로만 동작하는 SLAM 이므로, 공정한 성능 비교를 위해 추적 스레드(tracking thread)에 로봇의 휠 엔코더와 각속도센서를 융합한 오도메트리를 연동했고, 매핑 스레드(mapping thread)에서 특징점(feature point)의 삼차원 위치 추정 시 키프레임(Keyframe) 간 매칭정보와 키프레임 사이에 존재하는 일반 프레임 내에서의 특징 추적(feature tracking) 정보도 모두 사용했다. 매핑 스레드에서 2차원 평면상에 움직이는 로봇에 장착된 전방 카메라에 맞게 번들 어드저스트먼트(bundle adjustment)를 구현하여 적용했다.



그림 46 조도 측정 방법

4.2 시뮬레이션 실험 결과

그림 4-7 에서 알 수 있듯이 컴퓨터로 시뮬레이션한 결과, 제안한 방법은 18.4 cm의 오차를 보였지만, 기존 방법은 400.8 cm의 오차를 보였다. 기존 방법으로 시뮬레이션 할 때, AOFS와 저조도 영상개선 알고리즘을 적용하지 않았다.

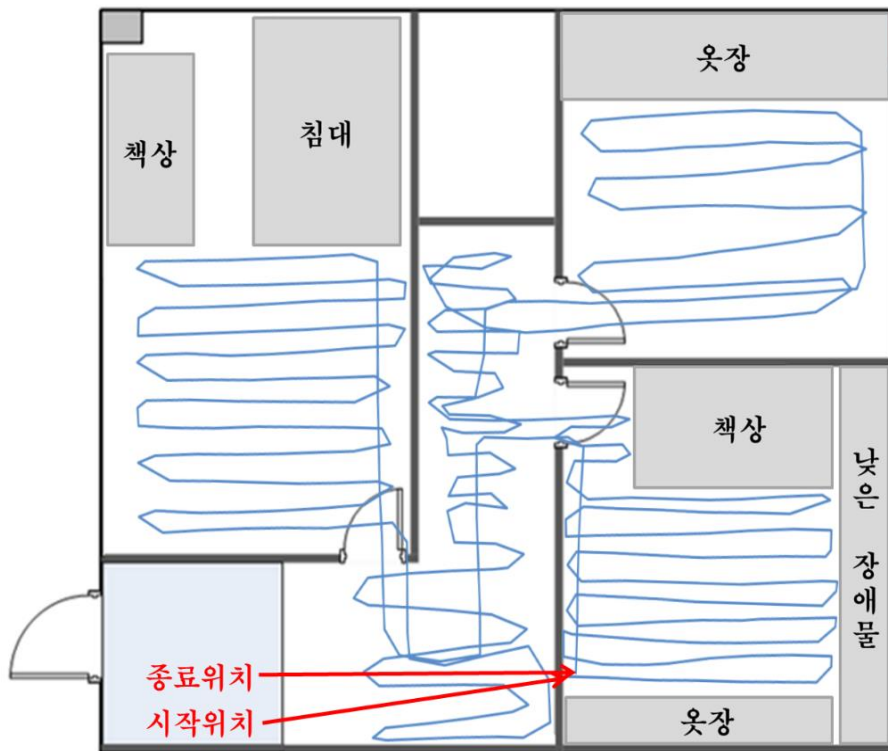


그림 4-7 저조도 환경에서의 제안하는 위치인식 방법 시뮬레이션 결과

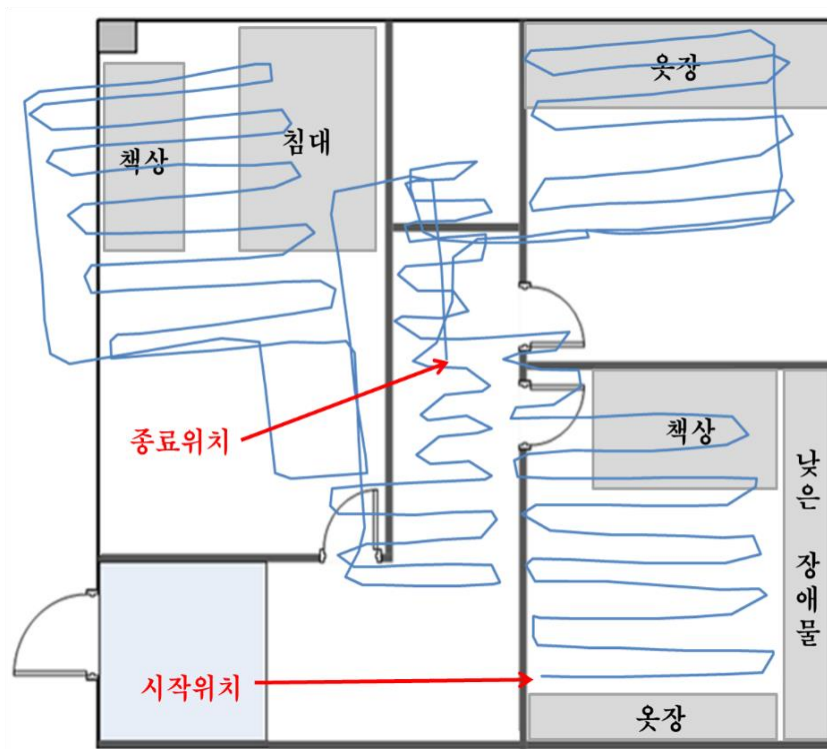


그림 4-8 저조도 환경에서 비교실험 결과

4.3 임베디드 실험 결과

CortexARM9 보드에 제안한 알고리즘을 포팅하여 실험한 결과(그림 4-9) 20.8 cm의 복귀오차를 보였다. 비교 대상으로 삼은 ORB-SLAM은 키프레임이 증가할 때마다 사용하는 메모리가 급속히 증가하므로, 메모리가 512MB 인 임베디드 보드 환경에서 동작시킬 수 없었다. 이미 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 10 lx 이하의 어두운 환경에서는 동작을 하지 않음을 알 수 있으므로 임베디드 보드에 포팅하여 실험하지는 않았다.

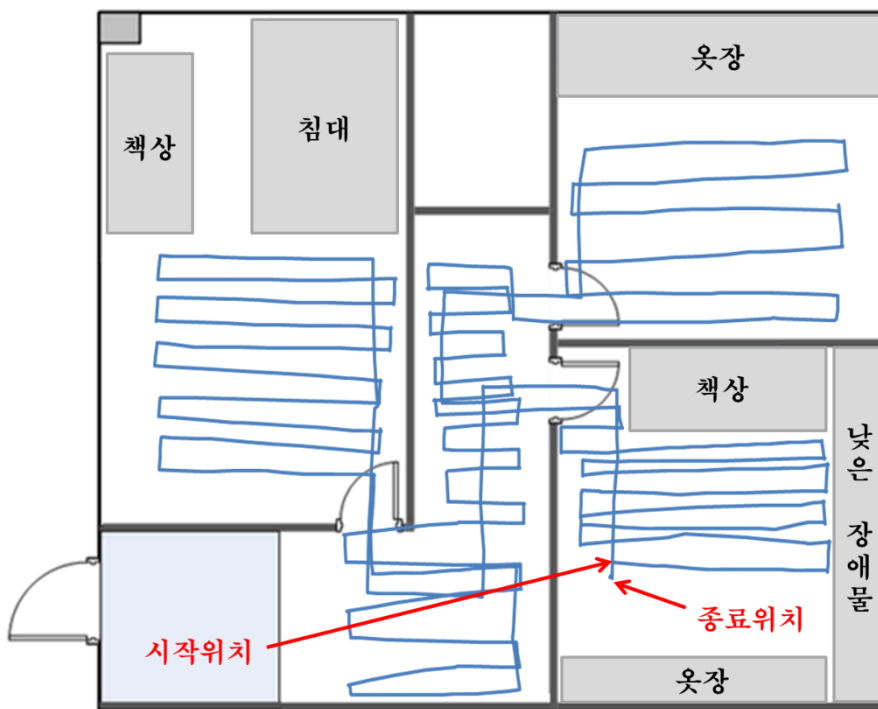


그림 4-9 저조도 환경에서 제안하는 위치인식 방법의 임베디드 보드 포팅 후 실시간 실험 결과

제5장 결론

본 논문에서는 전방 단안 카메라 기반 동시적 지도작성 및 위치인식 기술이 동작하기 어려운 0.15 lx 수준의 저조도 미끄러운 환경에서, 가장 저렴한 센서인 전방 단안카메라와 휠 엔코더, 각속도 센서 및 본 논문에서 제안한 AOFS를 융합하여 위치 추정 성능을 개선하는 방법을 제안하였다. AOFS를 하나만 사용하여, AOFS와 바닥 간 높이 변화에도 강인하게 미끄러진 변위 추정을 가능하게 했으며, 특징점 추출이 어려워 위치 인식에 활용하지 못했던 어두운 영상도, 개선하여 실내 서비스 로봇의 위치 추정 시 방위각 보정에 활용하는 기법을 제시했다. AOFS는 카펫이나 문턱 등반 시 발생하는 높이 변화 및 미끄러짐에 강인하게 주행거리를 추정하며, 저조도 영상도 히스토그램 평활화 후 롤링 가이던스 필터를 통해 조도 개선 및 영상 잡음을 없앤 후 소실점을 추출하여 로봇의 방위각을 보정하는데 활용하는 방안을 제시했으며, 바이콘 모션 캡처 시스템이 설치된 실험 공간에서 AOFS의 성능을 객관적으로 평가했다.

0.15 lx 수준의 저조도 환경에서 카펫을 설치한 후, 실내 서비스 로봇을 2 m × 1.5 m 직사각 영역 외곽으로 20 바퀴 주행했을 때, 위치 추정에 휠 엔코더와 각속도 센서만 사용할 경우 주행거리가 증가 할수록 미끄러짐에 의해 오차도 증가하여 최대 오차는 10,346 mm를 나타냈으며 각도 오차는

15.4도를 보였다. 하지만, AOFS를 추가로 사용하면 어두운 환경에서도 미끄러진 정도를 알 수 있어 위치 오차는 873 mm 로 줄어들었으나 각속도 센서의 각도 오차는 보상되지 않아 25.6도를 나타냈다. 이 때, 본 논문에서 제안하는 저조도 개선 알고리즘 적용 후 소실점을 활용한 로봇 방위각 보정 시 최대 위치 오차는 777mm 이고, 각도 오차는 1 도 이내를 보였다.

이어서, 저조도 가정환경에서 최신 영상기반 SLAM인 ORB SLAM과 성능 비교를 했다. 비교 실험의 위치 추정 센서는 전방 카메라, 휠 엔코더, 각속도 센서로 구성했으며, 본 논문이 제안하는 기법에 대한 실험은 전방 카메라, 휠 엔코더, 각속도 센서 및 AOFS를 사용했다. 우선, 로그를 획득하여 컴퓨터로 시뮬레이션을 통한 비교 후, 제안하는 알고리즘을 실내 이동 로봇에 포팅하여 실시간 실험을 수행했다. 0.1~10.0 lx 수준의 저조도 환경에서 실험결과 비교 실험의 복귀오차는 400.8 cm 였으나 제안하는 방법의 복귀오차는 18.4 cm 로 우수함을 확인했다.

본 논문에서 제안하는 방식을 실내 서비스 로봇에 적용할 경우, 저조도, 미끄러운 환경에서도 강인한 위치 추정이 가능할 것으로 사료되며, 개선된 저조도 영상을 활용하여 장소 인식(place recognition) 및 특징점 매칭을 통한 SLAM 도 가능하리라 판단된다.

참고 문헌

- [1] H. S. Ahn, I. K. Sa, and J. Y. Choi, "PDA-based mobile robot system with remote monitoring for home environment," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1487–1495, 2009.
- [2] W. H. Yun, D. Kim, and H. S. Yoon, "Fast group verification system for intelligent robot service," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1731–1735, 2007.
- [3] Y. R. Oh, J. S. Yoon, J. H. Park, M. Kim, and H. K. Kim, "A name recognition based call-and-come service for home robots," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 247–253, 2008.
- [4] K. C. Kwak and S. S. Kim, "Sound source localization with the aid of excitation source information in home robot environments," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 852–856, 2008.
- [5] J. S. Park, J. H. Kim, and Y. H. Oh, "Feature vector classification based speech emotion recognition for service robots," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1590–1596, 2009.
- [6] Z. Zhao, W. Chen, C. C. Y. Peter, and X. Wu, "A Novel Navigation System for Indoor Cleaning Robot," *IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics*, pp. 3–8, 2016.

- [7] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial Navigation Systems for Mobile Robots," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 11, no. 3, pp. 328–342, 1995.
- [8] J. Yi, J. Zhang, D. Song, and S. Jayasuriya, "IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 2845–2850, 2007.
- [9] S. P. S. Park and S. Hashimoto, "Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2366–2373, 2009.
- [10] S. Se, D. Lowe, and J. Little, "Vision-based Mobile Robot Localization And Mapping using Scale-Invariant Features," *Robot. Autom. 2001. Proc. 2001 ICRA. IEEE Int. Conf.*, vol. 2, pp. 2051–2058, 2001.
- [11] X. Luo, W. J. O'Brien, and C. L. Julien, "Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 2, pp. 355–363, 2011.
- [12] R. Showcase, J. Biswas, M. M. Veloso, and M. Veloso, "WiFi Localization and Navigation for Autonomous Indoor Mobile Robots," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4379–4384, 2010.
- [13] S. Krishnan, P. Sharma, Z. Guoping, and O. H. Woon, "A UWB based localization system for indoor robot navigation," *2007 IEEE Int. Conf. Ultra-Wideband*, pp. 77–

82, 2007.

- [14] J. Park, Y. K. Cho, and D. Martinez, “A BIM and UWB integrated Mobile Robot Navigation System for Indoor Position Tracking Applications,” *J. Constr. Eng. Proj. Manag.*, vol. 6, no. 2, pp. 30–39, 2016.
- [15] A. Rahimi, B. Dunagan, and T. Darrell, “Simultaneous calibration and tracking with a network of non-overlapping sensors,” *Proc. 2004 IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 187–194, 2004.
- [16] J. Huh, W. S. Chung, S. Y. Nam, and W. K. Chung, “Mobile Robot Exploration in Indoor Environment Using Topological Structure with Invisible Barcodes,” *ETRI J.*, vol. 29, no. 2, pp. 189–200, 2007.
- [17] D. Haehnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, and M. Philipose, “Mapping and Localization with RFID Technology,” *Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1015–1020, 2004.
- [18] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, and J.-M. Lavest, “Monocular Vision for Mobile Robot Localization and Autonomous Navigation,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 74, no. 3, pp. 237–260, 2007.
- [19] P. Smith, I. Reid, and A. Davison, “Real-Time Monocular SLAM with Straight Lines,” *BMVC*, vol. 1, pp. 17–26, 2006.

- [20] K. Lingemann, A. Nüchter, J. Hertzberg, and H. Surmann, “High-speed laser localization for mobile robots,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 51, no. 4, pp. 275–296, 2005.
- [21] R. Mur-Artal, J. Montiel, and J. Tardos, “ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” *arXiv Prepr. arXiv1502.00956*, 2015.
- [22] J. Engel, T. Schöps, D. Cremers, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-Scale Direct monocular SLAM,” *Comput. Vision–ECCV 2014*, vol. 8690 LNCS, no. PART 2, pp. 834–849, 2014.
- [23] G. Reina, L. Ojeda, A. Milella, J. Borenstein, and S. Member, “Wheel slippage and sinkage detection for planetary rovers,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 11, no. 2, pp. 185–195, 2006.
- [24] J. A. Cooney, W. L. Xu, and G. Bright, “Visual dead-reckoning for motion control of a Mecanum-wheeled mobile robot,” *Mechatronics*, vol. 14, no. 6, pp. 623–637, 2004.
- [25] M. Seyr and S. Jakubek, “Proprioceptive navigation, slip estimation and slip control for autonomous wheeled mobile robots,” *2006 IEEE Conf. Robot. Autom. Mechatronics*, 2006.
- [26] P. Batista, C. Silvestre, P. Oliveira, and B. Cardeira, “Accelerometer calibration and dynamic bias and gravity estimation: Analysis, design, and experimental evaluation,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 1128–1137, 2011.

- [27] J. D. Jackson, D. W. Callahan, and J. Marstrander, "A rationale for the use of optical mice chips for economic and accurate vehicle tracking," *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng. IEEE CASE 2007*, pp. 939–944, 2007.
- [28] C. McCarthy and N. Barnes, "Performance of optical flow techniques for indoor navigation with a mobile robot," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2, no. April, pp. 5093–5098, 2004.
- [29] J. Palacin, I. Valgañon, and R. Pernia, "The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 126, no. 1, pp. 141–147, Jan. 2006.
- [30] E. Brenner and J. B. J. Smeets, "Fast corrections of movements with a computer mouse," *Spat. Vis.*, vol. 16, no. 4, pp. 365–376, 2003.
- [31] T. W. Ng, "The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 107, no. 1, pp. 21–25, Oct. 2003.
- [32] D. H. Yi, T. J. Lee, and D. I. Cho, "Afocal optical flow sensor for reducing vertical height sensitivity in indoor robot localization and navigation," *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 11208–11221, 2015.
- [33] S. Y. Lee and J. B. Song, "Robust mobile robot localization using optical flow sensors and encoders," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Proceedings.*, vol. 2004, no. 4, p. 1039–1044 Vol.1, 2004.

- [34] A. Bonarini, M. Matteucci, and M. Restelli, "A kinematic-independent dead-reckoning sensor for indoor mobile robotics," *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 4, pp. 3750–3755, 2004.
- [35] A. Bonarini, M. Matteucci, and M. Restelli, "Automatic error detection and reduction for an odometric sensor based on two optical mice," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1675–1680, 2005.
- [36] D. Sekimori and F. Miyazaki, "Self-Localization for Indoor Mobile Robots Based on Optical Mouse Sensor Values and Simple Global Camera Information," *2005 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics*, pp. 605–610, 2005.
- [37] U. Minoni and A. Signorini, "Low-cost optical motion sensors: An experimental characterization," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 128, no. 2, pp. 402–408, Apr. 2006.
- [38] S. Kim and S. Lee, "Robust velocity estimation of an omnidirectional mobile robot using a polygonal array of optical mice," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, 2008.
- [39] R. Ross, J. Devlin, and S. Wang, "Toward refocused optical mouse sensors for outdoor optical flow odometry," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 6, pp. 1925–1932, 2012.
- [40] Xerox, "Capable of providing information of the amount and direction of relative movement between the device and a surface positioned," US4,794,384.
- [41] H. Dahmen and H. A. Mallot, "Odometry for ground moving agents by optic flow

- recorded with optical mouse chips.,” *Sensors*, vol. 14, no. 11, pp. 21045–64, Jan. 2014.
- [42] M. Dille, B. Grocholsky, and S. Singh, “Outdoor Downward-facing Optical Flow Odometry with Commodity Sensors,” *F. Serv. Robot.*, no. July, pp. 1–10, 2009.
 - [43] D. J. Hyun, H. S. Yang, H. R. Park, and H. S. Park, “Differential optical navigation sensor for mobile robots,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 156, no. 2, pp. 296–301, 2009.
 - [44] C. Park and J. B. Song, “Illumination Change Compensation and Extraction of Corner Feature Orientation for Upward-Looking Camera-Based SLAM,” *12th Int. Conf. Ubiquitous Robot. Ambient Intell.*, pp. 224–227, 2015.
 - [45] W. Maddern, A. D. Stewart, C. McManus, B. Upcroft, W. Churchill, and P. Newman, “Illumination Invariant Imaging: Applications in Robust Vision-based Localisation, Mapping and Classification for Autonomous Vehicles,” *Proc. Vis. Place Recognit. Chang. Environ. Work. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, p. 5, 2014.
 - [46] A. M. Reza, “Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement,” *J. VLSI Signal Process. Syst. Signal Image. Video Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 35–44, 2004.
 - [47] P. Corke, R. Paul, W. Churchill, and P. Newman, “Dealing with shadows: Capturing intrinsic scene appearance for image-based outdoor localisation,” *IEEE Int. Conf.*

- Intell. Robot. Syst.*, pp. 2085–2092, 2013.
- [48] R. Hummel, “Image enhancement by histogram transformation,” *Comput. Graph. Image Process.*, vol. 6, no. 2, pp. 184–195, 1977.
 - [49] E. H. Land and J. J. McCann, “Lightness and Retinex Theory,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 61, no. 1, pp. 1–11, 1971.
 - [50] Z. Rahman, D. J. Jobson, and G. a. Woodell, “Retinex processing for automatic image enhancement,” *J. Electron. Imaging*, vol. 13, no. 1, p. 100, 2004.
 - [51] E. H. Land, “The retinex theory of color vision.,” *Sci. Am.*, vol. 237, no. 6, pp. 108–128, 1977.
 - [52] Q. Zhang, X. Shen, L. Xu, and J. Jia, “Rolling guidance filter,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8691 LNCS, no. PART 3, pp. 815–830, 2014.
 - [53] P.-S. Wang, X.-M. Fu, Y. Liu, X. Tong, S.-L. Liu, and B. Guo, “Rolling guidance normal filter for geometric processing,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 34, no. 6, pp. 1–9, 2015.
 - [54] J. Greivenkamp and S. P. I. Engineers, *Field guide to geometrical optics*. 2004.
 - [55] J. N. Howard, “Strutt, John William, third Baron Rayleigh (1842–1919),” *Appl. Opt.*,

vol. 3, no. 10, pp. 1091–1101, 1964.

- [56] Avago, “ADNS-3080 and ADNS-3088 High Performance Optical Sensor.” [Online]. Available: <http://www.alldatasheet.com>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [57] Avago, “Optical Mice and How They Work.” [Online]. Available: <http://www.digikey.com>. [Accessed: 11-Nov-2017].
- [58] H. Y. Siah, T.H. Kong, “Optical Navigation Using One-Dimensional Correlation,” US7315013, 2004.
- [59] M. J. Mensov, S.N. Lee, H.Y. Kim, S.W. Yi, D.H. Yoon, J.S. Yoon, H.W. Park, D.W. Cho, “Sensor System and Position Recognition System,” KR1013049480000, 2013.
- [60] DIMETIX, “DLS-B 30.” [Online]. Available: <http://www.dimetix.com>. [Accessed: 11-Nov-2017].
- [61] Dream Robot System, “DRSB90.” [Online]. Available: <http://www.drs11.co.kr>. [Accessed: 11-Apr-2017].
- [62] Microchip, “dsPIC33FJ256MC710A.” [Online]. Available: <http://www.microchip.com>. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [63] ViICON, “Vantage V5.” [Online]. Available: <http://www.vicon.com>. [Accessed: 06-

May-2017].

- [64] H. C. Chang, S. H. Huang, and S. H. Lai, “Using line consistency to estimate 3D indoor Manhattan scene layout from a single image,” *Proc. - Int. Conf. Image Process. ICIP*, pp. 4723–4727, 2015.
- [65] C. Rother, “A new approach for vanishing point detection in architectural environments,” *Proc. BMVC.*, vol. 20, no. 9, pp. 382–391, 2000.
- [66] L. Zhang, H. Lu, X. Hu, and R. Koch, “Vanishing Point Estimation and Line Classification in a Manhattan World,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 117, no. 2, pp. 111–130, 2016.
- [67] E. Tretyak, O. Barinova, P. Kohli, and V. Lempitsky, “Geometric image parsing in man-made environments,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 97, no. 3, pp. 305–321, 2012.
- [68] V. Hedau, D. Hoiem, and D. Forsyth, “Recovering the spatial layout of cluttered rooms,” *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 1849–1856, 2009.
- [69] C. Rother, “A new approach to vanishing point detection in architectural environments,” *Image Vis. Comput.*, vol. 20, no. 9–10, pp. 647–655, 2002.
- [70] A. G. Schwing and R. Urtasun, “Efficient exact inference for 3D indoor scene understanding,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, pp. 299–313, 2012.

- [71] A. Baligh Jahromi and G. Sohn, "Edge Based 3D Indoor Corridor Modeling Using a Single Image," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. II-3/W5, pp. 417–424, 2015.
- [72] A. Flint, D. Murray, and I. Reid, "Manhattan scene understanding using monocular, stereo, and 3D features," *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 2228–2235, 2011.
- [73] O. Haines and A. Calway, "Detecting planes and estimating their orientation from a single image," *Proceedings Br. Mach. Vis. Conf. 2012*, vol. 2, p. 31.1-31.11, 2012.
- [74] D. Hoiem, A. A. Efros, and M. Hebert, "Geometric context from a single image," *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, vol. 1, pp. 654–661, 2005.
- [75] H. Jia and S. Li, "Estimating structure of indoor scene from a single full-view image," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4851–4858, 2015.
- [76] S. Park, H. Lee, S. Lee, and H. S. Yang, "Line-based single view 3D reconstruction in Manhattan world for augmented reality," *Proc. 14th ACM SIGGRAPH Int. Conf. Virtual Real. Contin. its Appl. Ind.*, pp. 89–92, 2015.
- [77] S. Ramalingam and M. Brand, "Lifting 3D Manhattan Lines from a Single Image," *Comput. Vision, IEEE Int. Conf.*, vol. 1, pp. 497–504, 2013.
- [78] A. G. Schwing, S. Fidler, M. Pollefeys, and R. Urtasun, "Box in the box: Joint 3D layout and object reasoning from single images," *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*,

pp. 353–360, 2013.

- [79] F. Srajer, A. G. Schwing, M. Pollefeys, and T. Pajdla, “MatchBox: Indoor image matching via box-like scene estimation,” *Proc. - Int. Conf. 3D Vis.*, pp. 705–712, 2015.
- [80] TES, “TES-1335.” [Online]. Available: <http://www.tes.com.tw>. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [81] E. Rublee and V. Rabaud, “ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF,” *Comput. Vis.*, 2011.
- [82] R. Mur-Artal and J. Tardos, “ORB-SLAM: tracking and mapping recognizable features,” *Proceeding Robot. Sci. Syst.*, 2014.
- [83] P. F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli, “Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces,” *Br. Mach. Vis. Conf.*, p. 13.1-13.11, 2013.

Abstract

Localization in Low Luminance, Slippery Indoor Environment Using Afocal Optical Flow Sensor and Image Processing

Dong-Hoon Yi

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This paper introduces a novel method for position estimation in low-light slippery indoor robotic navigation using an afocal optical flow sensor (AOFS) and a front camera-based image processing. The OFS used in computer optical mouse has been adopted for mobile robots because it is not affected by wheel slippage. Vertical height variance is thought to be a dominant factor in systematic error when estimating moving distances in mobile robots driving on uneven surfaces.

We propose an approach to mitigate this error by using an afocal (infinite effective focal length) system. We conducted experiments in a linear guide on carpet and three other materials with varying sensor heights from 30 to 50 mm and a moving distance of 80 cm. The same experiments were repeated 10 times. For the proposed afocal OFS module, a 1 mm change in sensor height induces a 0.1% systematic error; for comparison, the error for a conventional fixed-focal-length OFS module is 14.7%. Finally, the proposed afocal OFS module was installed on a mobile robot and tested 10 times on a carpet for distances of 1 m. The average distance estimation error and standard deviation are 0.02% and 17.6%, respectively, whereas those for a conventional OFS module are 4.09% and 25.7%, respectively. After brightening the low-illuminance image received from the front camera by using histogram equalization, the rolling guidance filter was applied to eliminate the image noise and sharpen the image boundary. In the image with improved brightness and noise, a number of straight line segments distributed in the indoor environment were extracted and classified in similar directions, and three directions orthogonal to each other were obtained to estimate the vanishing point. This paper proposed a method to estimate the angular difference between space and robot by using the vanishing point and to use it to correct the azimuth of the robot.

We experimented with an indoor mobile robot which equipped with an AOFS and the ARM9 board that embedding the proposed method. The experiment was carried out in a low luminance environment of 0.06 ~ 0.21 lx. The results show that the ORB SLAM has a return error of 400.8 cm, but the return error of the proposed method is 18.4 cm.

Keywords : AOFS, indoor localization, low brightness image

Student Number : 2014-31072

